

# DOKTORI ÉRTEKEZÉS

## Csillagkeletkezés a galaktikus határfelületeken

A Tejútrendszerben található presztelláris és protosztelláris objektumok  
nagyléptékű eloszlásának vizsgálata a csillagközi anyag sűrű-ritka  
határfelületein



Készítette: Marton Gábor  
ELTE TTK Fizika Doktori Iskola  
Doktori iskola vezetője: Dr. Palla László

Részecskefizika és csillagászat doktori program  
Programvezető: Dr. Csikor Ferenc

Témavezető: Dr. Tóth L. Viktor PhD, egyetemi adjunktus  
ELTE Földrajz- és Földtudományi Intézet Csillagászati Tanszéke

Budapest  
2013



# Tartalomjegyzék

<b>Előszó</b>	<b>1</b>
<b>1. Bevezető</b>	<b>3</b>
1.1. A csillagközi anyag szerkezete, jellemzői . . . . .	3
1.2. Buborékok a csillagközi anyagban . . . . .	5
1.3. Csillagkeletkezés, a korai csillagfejlődés állapotai . . . . .	8
1.4. Csillagkeletkezés a buborékok falában . . . . .	12
<b>2. A C3PO eloszlásának vizsgálata</b>	<b>15</b>
2.1. A Planck űrtávcső . . . . .	15
2.2. C3PO . . . . .	16
2.2.1. Cold Cores projekt . . . . .	16
2.2.2. A hideg felhőcsomók katalógusa . . . . .	16
2.3. A C3PO nagyléptékű eloszlásának vizsgálata . . . . .	17
2.3.1. Összevetés a HI héjakkal . . . . .	17
2.3.2. Összevetés a távoli-infravörös hurkokkal . . . . .	20
2.4. A C3PO csomók tulajdonságainak eloszlása az infravörös hurkokon . . .	25
2.4.1. Fizikai paraméterek a Planck mérések alapján . . . . .	25
2.4.2. Fizikai paraméterek Herschel mérések alapján . . . . .	28
<b>3. Az AKARI FCsO katalógus előállítása</b>	<b>31</b>
3.1. Az AKARI műhold és a távoli-infravörös pontforrás katalógus . . . . .	31
3.2. Kétszín diagramok . . . . .	32
3.3. Szín-fényesség diagramok . . . . .	35
3.4. Klasszifikáció lineáris diszkriminancia-analízis segítségével . . . . .	37
3.5. Azonosítás kvadratikus diszkriminancia-analízis segítségével . . . . .	39
3.6. A FCsO minta előállítása AKARI+WISE adatok segítségével . . . . .	41
<b>4. Az AKARI FCsO jelöltek eloszlásának vizsgálata</b>	<b>45</b>
4.1. Felületi sűrűség-eloszlás vizsgálata a galaktikus koordináták szerint . . .	45
4.2. A FCsO-ok és a galaktikus $^{12}\text{CO}$ eloszlásának vizsgálata . . . . .	46
4.3. A FCsO-ok és a galaktikus hurkok eloszlásának vizsgálata . . . . .	48
4.3.1. Vizsgálatok a teljes égbolton . . . . .	48
4.3.2. Vizsgálatok a külső Galaxisban . . . . .	52
4.4. Az infravörös hurkok aktivitását kiváltó tényezők . . . . .	53
4.5. AKARI FCsO-ok a Herschel Cold Cores mezőkben . . . . .	59

<b>5. A WISE FCsO jelöltek</b>	<b>63</b>
5.1. A FCsO azonosítás lépései . . . . .	63
5.1.1. Statisztikai módszerek . . . . .	63
5.1.2. Az extragalaktikus források eltávolítása . . . . .	65
5.1.3. A mezőcsillagok eltávolítása . . . . .	67
5.1.4. A FCsO-ok azonosítása . . . . .	67
5.2. Eredmények . . . . .	69
5.2.1. A FCsO minta jellemzői . . . . .	69
5.2.2. A minta szennyezettsége . . . . .	71
5.2.3. Klasszifikáció fejlődési állapotok szerint . . . . .	72
5.3. Összehasonlítás korábbi eredményekkel . . . . .	73
5.4. FCsO-ok a Lynds 1188 sötét felhőben . . . . .	75
5.4.1. A FCsO jelöltek . . . . .	77
5.4.2. A FCsO jelöltek osztályozása . . . . .	77
5.4.3. Csoportok azonosítása . . . . .	78
5.4.4. A FCsO-ok eloszlásának összevetése a CO felhőmagokkal . . . . .	79
5.5. Indukált csillagkeletkezés a Rozetta molekulafelhőben . . . . .	82
<b>6. A boloSource algoritmus</b>	<b>85</b>
6.1. Módszerek és megvalósítás . . . . .	86
6.2. Eredmények . . . . .	88
6.3. Következtetések . . . . .	89
6.4. Alkalmazása . . . . .	92
<b>Köszönetnyilvánítás</b>	<b>93</b>
<b>Irodalomjegyzék</b>	<b>95</b>
<b>Összefoglaló</b>	<b>109</b>
<b>Summary</b>	<b>111</b>







# Előszó

Az Univerzum kezdeti kémiai összetételét az ősi nukleoszintézis során a kvark-gluon plazmából hűlés folyamán létrejött H, He és Li határozta meg. Az anyag korai eloszlásában található sűrűségfluktuációknak köszönhetően létrejöttek a környezetüknél sűrűbb területek, amelyek gravitációs összehúzódása elősegítette az első csillagok keletkezését. Ettől kezdve az anyag kémiai fejlődését a csillagok belsejében zajló termonukleáris reakciók, valamint a nagytömegű csillagok életének végső stádiumában bekövetkező szupernóva-robbanások alakították, mivel a vasnál nagyobb tömegszámú elemek ezen robbanások során jönnek létre, és a csillagközi anyagba (CsKA) is főként az ilyen robbanásoknak köszönhetően keverednek el a magreakciókban létrejött elemek. A nagytömegű csillagok nem csak a kémiai fejlődésre vannak hatással, hanem a CsKA eloszlására is. Életük során a nagytömegű csillagok csillagszele, valamint a végső csillagfejlődési stádiumban bekövetkező szupernóva robbanás miatt kialakuló lökéshullám előtt a CsKA feltorlódik, ezáltal egy sűrűbb héj jön létre. Ezekben a héjakban könnyedén kialakulhatnak olyan gravitációs instabilitások, amelyek a csillagok újabb generációjának születéséhez vezetnek. A létrejövő új populációs csillagok aztán ismét megváltoztatják az anyag eloszlását és kémiai összetételét. A fiatal csillagok és keletkezésük körülményeinek vizsgálata tehát nélkülözhetetlen ahhoz, hogy megismerhessük univerzumunk időbeli kémiai fejlődését, valamint a galaxisok morfológiai változását.

A kitüntetett érdeklődésnek köszönhető az, hogy a közelmúltban számos űrkutatási program vizsgálta a csillagkeletkezést. A protocsillagok körüli anyag a nagy oszlopsűrűség miatt optikailag átlátszatlan, ezért csak a környező porburok felmelegítése által kibocsátott infravörös fotonokat észlelhetjük. A földi légkör azonban a távoli infravörös sugárzást egyáltalán nem, a közeli- és a közép-infravörös sugárzást pedig csak nagyon korlátozottan ereszti át. A légkörön kívülre bocsátott űrtávcsövek viszont lehetővé tették az elmúlt 30 évben, hogy egyre részletesebb és pontosabb képet alkossunk a csillagkeletkezésről és a csillagfejlődés korai stádiumairól. Az első, távoli-infravörös tartományban észlelő IRAS (Infrared Astronomical Satellite, Neugebauer és mtsai. 1984) űrtávcső  $12\mu\text{m}$ -en 0,5 ívperc felbontással kb. 0,5 Jy-nél fényesebb forrásokat volt képes megfigyelni. Kb. 350 ezer objektumról szolgáltatott több hullámhosszon fényességet, ezzel mintegy 80%-kal megnövelve az addig ismert infravörös égi objektumok számát. A fejlődést jól mutatja, hogy a WISE (Wide-field Infrared Surveyor Explorer, Wright és mtsai. 2010) űrtávcső ugyanezen a hullámhosszon 6,5 ívmásodperces felbontással rendelkezik, és az 1 mJy-nél fényesebb forrásokat már  $5\sigma$  pontossággal képes érzékelni. A WISE mérésein alapuló adatbázis több mint 564 millió forrás adatait katalogizálja, melyeknek jelentős hányada a Tejútrendszeren kívül elhelyezkedő extragalaktikus forrás.

A pontszerű, vagy nagyon kis kiterjedéssel rendelkező objektumok mellett az infravörös sugárzás detektálása lehetővé tette, hogy a Tejútrendszer csillagközi anyagának struktúráját is megfigyeljük, ha a por kiterjedt IR emisszióját különböző léptékeken ta-

nulmányozzuk. A CsKA szerkezete változatos, üregek, hurkok, héjak és láncok komplex együttese. Gyakran " kozmikus habfürdő " néven is említik (Brand és mtsai. 1975).

Dolgozatomban többsávú infravörös fotometriai adatok alapján megtalálom a kialakuló, fiatal és ezért az infravörös tartományban fényes csillagszerű objektumokat (FCsO). Megvizsgálom, hogy galaktikus skálákon jellemzően milyen környezetben zajlik a csillagkeletkezés. Létezik-e korreláció a csillagközi anyagban található, sűrű-ritka határfelületekként azonosított távoli-infravörös hurkok és a hideg felhőmagok, FCsO-ok eloszlása között? Vannak-e a csillagkeletkezésnek kitüntetett helyei, és miért azok? Felfedezhetők-e olyan jellemzők, amelyek arra utalnak, hogy a FCsO-ok, és a hideg csillagközi felhőmagok valamilyen külső hatás következtében alakultak ki?

Az első fejezetben áttekintést adok a csillagkeletkezés folyamatáról, bemutatom a korai csillagfejlődés különböző stádiumait és azt, hogy az esetleges külső hatások miatt létrejövő buborékok és hurkok milyen hatással bírnak a csillagok keletkezésben. Az ezt követő fejezetek sorrendje a csillagok fejlődési fázisainak sorrendjét követi.

A második fejezetben a Planck űrtávcső méréseiből előállított Cold Clump Catalog of Planck Objects (C3PO, Planck collaboration, 2011) forrásainak eloszlását vizsgálom. Ezek az objektumok tekinthetők a csillagkeletkezés legelső fázisának.

A harmadik fejezetben az AKARI műhold FIS műszere által detektált, távoli-infravörösben is fényes, ezért valószínűleg még porburokkal rendelkező FCsO válogatására általam használt különböző módszereket, valamint a kapott eredményeket mutatom be.

A negyedik fejezetben az általam előállított, fiatal, keletkező csillagjelölteket tartalmazó katalógus objektumainak eloszlását vizsgálom, összevetve azt a galaktikus CO és az infravörös hurkok eloszlásával.

Az ötödik fejezetben a közeli- és közép-infravörös WISE mérések alapján előállított FCsO jelöltek katalógusát, valamint a válogatás egy felhasználását mutatom be egy molekuláris gázból álló, gyűrű alakú csillagközi felhőrendszerre.

A hatodik fejezetben a "boloSource()" elnevezésű algoritmust mutatom be, amelynek Jython környezetbe ültetését és optimalizálását végeztem. Segítségével szétválasztom a Herschel űrtávcső PACS műszerének mérési idősoraiban a diffúz infravörös háttér és pontforrások jelét, előállítva háttér nélküli, csak forrásokat tartalmazó térképeket. Ezen elvégzem a források fotometriáját, és az eredményeket összevetem a hagyományos fotometriai módszerek eredményeivel.

Munkám részét képezi a "Galactic Cold Cores" elnevezésű, ún. kulcs projektnek. A projekt a European Space Agency (ESA) által fejlesztett és működtetett Planck és Herschel űrtávcsövek méréseit felhasználó nemzetközi együttműködés. A projekt fő célja a csillagközi anyagba beágyazott sűrű, hideg felhőmagok felfedezése, valamint ezen felhőmagok részletes vizsgálata, a csillagok keletkezését elindító és a folyamat során végbe menő fizikai folyamatok pontosabb megértése. Munkám szintén részét képezi az "AKARI Mission Program for Star and Planet Formation" projektnek.

# 1. fejezet

## Bevezető

A CsKA tágabb értelemben véve a csillagközi térben található gáz, por, plazmaanyag, sugárzási és mágneses tér keverékét jelenti, de dolgozatomban csak a csillagközi teret kitöltő port, valamint az atomos és molekuláris gázt értem alatta. A csillagkeletkezés során ebből alakulnak ki az új csillagok. A csillagfejlődési elméletek és a megfigyelések szerint a nagy tömegű csillagok élettartama viszonylag rövid ( $10M_{\odot}$  esetén  $\sim 3 \times 10^6$  év), ezért a csillagkeletkezés nem egy időben kezdődött és egy időben ér véget, hanem egy most is zajló aktív folyamat. A továbbiakban rövid áttekintést adok a CsKA jellemző tulajdonságairól, szerkezetéről, a felhőmagok (a csillagok közvetlen elődei) tulajdonságairól, a csillagkeletkezési elméletekről, a korai csillagfejlődési állapotokról, a CsKA szerkezetét és a csillagfejlődést befolyásoló folyamatokról.

A kutatásaim elméleti hátterének kidolgozását elsősorban átfogó, összefoglaló jellegű tudományos publikációk segítségével végeztem. A csillagkeletkezéssel kapcsolatos legújabb elméletek és legfrissebb eredmények leírásában - többek mellett - főleg Ralf S. Klessen 2011-es "Star Formation in Molecular Clouds" című publikációjára alapoztam. A csillagközi anyagban kialakuló buborékos szerkezet és azok csillagkeletkezésre gyakorolt hatásának leírásában főként Bruce G. Elmegreen 2011-es "Triggered Star Formation" című, Guillermo Tenorio-Tagle és Peter Bodenheimer "Large-scale Expanding Superstructures in Galaxies" című 1988-as, valamint Lise Deharveng és mtsai. "A gallery of bubbles - The nature of the bubbles observed by Spitzer and what ATLASGAL tells us about the surrounding neutral material" című 2010-es publikációjára támaszkodtam. Felhasználtam még Kóspál Ágnes (2009), Kiss Zoltán Tamás (2008) és Könyves Vera (2007) doktori dolgozatainak témába vágó részleteit is.

### 1.1. A csillagközi anyag szerkezete, jellemzői

A CsKA hierarchikus szerkezetként írható le, melyben a  $10^5 M_{\odot}$  nagyságrendbe eső tömeggel és  $100 \text{ cm}^{-3}$  átlagsűrűséggel rendelkező képződményeket óriás molekulafelhőknek

(GMC) nevezzük. A GMC-k belsejében, vagy ritka esetekben azokon kívül elhelyezkedő,  $100M_{\odot}$  tömegű,  $\sim 1000\text{cm}^{-3}$  sűrűségű objektumokat felhőknek nevezzük. A felhők belsejében létrejövő,  $\sim 10M_{\odot}$  tömegű és  $10^4\text{cm}^{-3}$ -nél nagyobb sűrűségű, gravitációsan kötött objektumokat hívjuk felhőmagoknak. A Tejútrendszerben jellemzően a GMC-kben helyezkednek el a csillagok, nagy és kis tömeggel rendelkezők vegyesen. A GMC-ken kívül található, a felhőmagozhoz sok tekintetben hasonló, de izoláltan elhelyezkedő ún. globulákban viszont nem jellemző a nagytömegű csillagok keletkezése.

A molekulafelhők változatos méretűek és alakúak, általában szabálytalanok, de többnyire szálas szerkezetet mutatnak, melyet már Barnard (1907) is megfigyelt. Ezek a szálak gyakran csillaghalmazok keletkezésének színterei (Tachihara és mtsai. 2002, Burkert & Hartmann, 2004). A sebesség eloszlása alapján azt a következtetést lehet levonni, hogy nem a csillagkeletkezés hatására jöttek létre a szálak, hanem pont ellenkezőleg: a felhőkben kialakult szálas szerkezetet követi a fiatal csillagok eloszlása. A CsKA térfogatának nagyjából 10%-át teszik ki a molekulafelhők (Elmegreen, 2002). A tömegük azonban jelentős, főleg a galaktikus fősík közelében (a  $Z$  skálamagasság kb. 50-75 pc), ahol az anyag nagyrészt molekuláris (Robertson & Kravtsov, 2008). A meleg, atomos gáz esetében  $Z=130\text{-}400$  pc, míg az ionizált gáznál  $Z \sim 1000$  pc.

A sűrű felhőmagok térfogata és a térfogati kitöltési faktor alacsony,  $n > 10^5\text{cm}^{-3}$  esetén pár százalék (Blitz 1993, McKee 1999, Williams és mtsai. 2000, Beuther és mtsai. 2000). Ez egyenes következménye annak, hogy nagy léptékeken a turbulencia erősen szuperszonikus a CsKA-ban. A csillagkeletkezés mindig a legsűrűbb területeken indul meg, tehát a molekulafelhők anyagának csak kis része vesz részt a csillagok felépítésében, nagyobb része mindig kis sűrűségű marad. A felhőmagok tömegspektruma jól leírható egy hatványfüggvénnyel:

$$\frac{dN}{dm} \propto m^{\alpha}, \quad (1.1)$$

ahol az  $\alpha$  kitevő értéke -1,3 és -1,8 közé esik (Stutzki & Güsten 1990, Williams és mtsai. 1994, Kramer és mtsai. 1998). A legkisebb megfigyelt felhőmagok kevesebb mint egy naptömeggel rendelkeznek (Juvela és mtsai. 2012), és 0,1 pc-nél is kisebb méretűek. Egy adott molekulafelhőn belül megfigyelhető egy egyetemes tömegspektrum, amiben a tömeg három nagyságrendet változhat, nagyjából  $1M_{\odot}$  és  $1000M_{\odot}$  között (Klessen, 2011). Valószínűleg azok a fizikai folyamatok, amelyek meghatározzák a csillagok tömegét, nagyon hasonlóak felhőről felhőre, valamint szoros kapcsolatban vannak a turbulens áramlásokkal és az öngravitáló gáz termális instabilitásával. Érdekes megjegyezni, hogy kisebb skálákon a presztelláris magok tömegfüggvénye két hatványfüggvénnyel írható le a legjobban:  $dN/dM \propto m^{-\alpha}$ , ahol  $\alpha$  értéke  $0,5M_{\odot}$  alatt 1,5, ennél nagyobb tömeg esetén pedig 2,5. A jelenség első nagyobb tanulmánya Motte és mtsai. 1998-as publikációja, amiben a  $\rho$  Oph területen vizsgáltak szubmilliméteres magokat. IRAM adatok felhasználásával

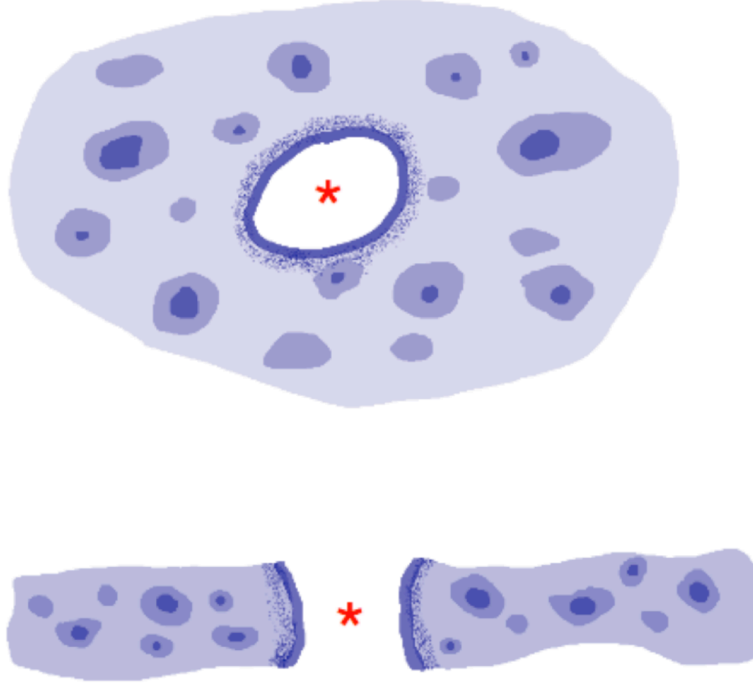
lásával összesen 58 csillag nélküli magot fedeztek fel, melyek a tömege  $0,05$  és  $3M_{\odot}$  közé esett. A jelenlegi összes megfigyelési adat (pl. Alves és mtsai. 2007, Ward-Thompson és mtsai. 2007, Lada és mtsai. 2008) azt támasztja alá, hogy a presztelláris felhőmagok tömegfüggvénye nagyon hasonlít a csillagok kezdeti tömegfüggvényére (IMF). A megfigyelések azt is mutatják, hogy ezeknek a magoknak tekintélyes hányada nem éri el azt a kritikus tömeget, ami megindítaná a mag gravitációs kollapszusát.

## 1.2. Buborékok a csillagközi anyagban

A közeli spirálgalaxisokról készült nagy felbontású felvételeken sokszor láthatóak spirálkarokban elhelyezkedő, porból és gázból álló buborékok. A sugaruk gyakran nagyobb, mint a gáz skálamagassága, emiatt nem gömb alakúak, inkább gyűrűt formálnak (ld. 1.1. ábra, Beaumont & Williams). A gyűrű forma azonban lehet látszólagos is. Mivel a buboréknak csak a kétdimenziós vetületét látjuk, ezért a buborék szélének irányában több CsKA-ból érkeznek a fotonok, mint a buborék közepének irányából. Emiatt a buborék infravörös hullámhosszakon egy fényes gyűrűként jelenik meg. Könnyen felismerhetők még madártoll vagy üstökös alakú struktúrák, amelyek mind a közelmúltban vagy éppen most is zajló dinamikai folyamatok jelei. Néha találhatunk kisebb buborékokat a nagyobb buborékok belsejében, és általában több buborék van a spirálkarokban, mint a karok közötti térben. A spirálkarok között is találhatunk port, amelynek eloszlása arra utal, hogy régen ott is buborékok lehettek.

Hatalmas héjak vannak például a Nagy Magellán-felhőben (LMC) (Goudis & Meaburn, 1978), ezek közül a legnagyobb az LMC4, amelynek a középpontjában nincs se csillagalmaz, se OB asszociáció, habár vannak A típusú csillagok, amelyek alapján a héjak kora  $\sim 30$  millió év (Efmerov & Elmegreen, 1998). A szélén "oszlopok" találhatóak, amelyekben fiatal csillagok keletkeznek, illetve van egy fiatal csillagokból álló ív is, amelynek a közepében nincsen csillagközi gáz. Yamaguchi és mtsai. (2001) vizsgálták ezt a csillagkeletkezési régiót, és azt találták, hogy a GMC-k és a fiatal csillagok mind a héjak szélén találhatóak, valószínűleg indukált csillagkeletkezés eredményeként. Az IC10 jelű galaxis szintén egy HI buborékokat nagy számban tartalmazó galaxis. Wilcots & Miller (1998) a héjak szélén  $H\alpha$  sugárzást detektáltak, és ezeket a területeket indukált csillagkeletkező területként azonosították.

A Tejútrendszerben is találhatunk nagy buborékokat. Heiles (1979) felfedezett egy óriási HI héjat, aminek keletkezésére az első részletes magyarázat egy OB asszociáció volt (Bruhweiler és mtsai. 1980). Hamarosan több magyarázat is született a héjak kialakulására, az egyik szerint egy extragalaktikus felhő ütközött a galaktikus diszkkal, és a keletkező héj fragmentálódása által jöttek létre a molekulafelhők (Tenorio-Tagle, 1981). Infravörös térképek alapján készült a Galaktikus Infravörös Hurkok katalógusa (Kiss és



1.1. ábra. Egy csillagközi gyűrű vázlatos rajza (Beaumont & Williams 2010). A közép-pontban lévő OB csillagok kitisztították a lapult molekulafelhő középső területeit. A felső ábra egy felülnézeti vázlat, míg az alsó ábrán oldalnézetből látható a gyűrű.

mtsai. 2004, Könyves és mtsai. 2007). Vizsgálataik alapján a buborékok belsejét kitöltő híg, forró gáz térfogati kitöltési aránya a galaxisunk belső részeiben a teljes térfogat 30%-át adja, míg a külső Galaxisban kb. 5%-ot. A külső Galaxis esetén megállapított érték összhangban van Ehlerová és Palouš (2005) eredményeivel. Ők HI héjakat katalogizáltak, kb. 5%-nak találták a buborékok térfogatának arányát, átlagos kornak pedig 8,4 millió évet adtak meg. Mivel a HI héjak atomos anyagból állnak, ezért ezek függetlenek a molekuláris anyagtól. Az óriás molekulafelhők (GMC-k) a térfogat kis százalékát teszik ki, és a köztük lévő teret foglalják el a héjak. A HI héjak tömegének szignifikáns hányada valószínűleg a belső Galaxisban elhelyezkedő GMC-k szétszakadásából jön, ahol a molekuláris anyag jelentős mennyiségben van jelen.

A táguló buborékok többnyire HII régiók, szupernóvák és csillagszelek által okozott nyomásfrontok. A tágulás sebességét egy izotermális lökeshullámra a következőképpen írhatjuk fel:

$$dR/dt \sim (P/\rho)^{1/2}, \quad (1.2)$$

ha a  $\rho$  sűrűség állandó, a  $P$  nyomás pedig az  $R$  sugár függvénye. Ebben az esetben a sugár az időnek valamilyen hatványfüggvényeként változik. HII régiók esetében

$$P = 2,1nkT, \quad (1.3)$$



ahol

$$n = (3S/4\pi R^3 \alpha)^{1/2}. \quad (1.4)$$

$S$  az ionizáló luminozitás foton/másodperc mértékegységben,  $\alpha$  az alapállapot rekombinációs rátája. Így  $P \propto R^{-3/2}$ -nel. Szupernóvák esetében a nem-radiatív fázisban, ahol az energia megmarad:

$$P \propto \frac{3E}{4\pi R^3}, \quad (1.5)$$

csillagszél esetében pedig:

$$P \propto \frac{3E(t)}{4\pi R^3}, \quad (1.6)$$

ahol az energia növekedését az  $E = Lt$  formulával adhatjuk meg. Ez a három nyomás-sugár arányosság három különböző sugár-idő függvényt ad.  $P \propto R^{-3/4}$  esetén  $R \propto t^{4/7}$  egy Strömgren gömbre,  $P \propto R^{-3/2}$ -nél  $R \propto t^{2/5}$  a szupernóva Sedov fázisában és  $dR/dt \propto t^{1/2} R^{-3/2}$  esetén  $R \propto t^{3/5}$  az állandó csillagszélre, vagy egy OB asszociációból jövő többszörös szupernóvarobbanások által okozott folyamatos energiabevitelre felírva (Castor és mtsai. 1975).

Ezekben a megoldásokban számos probléma merülhet fel. Mindig van egy külső nyomás, ami lassítja a buborékok tágulását. A külső nyomás ( $P_{ext}$ ) egy konstansként jelenik meg az egyenletben:

$$\frac{dR}{dt} \propto \left( \frac{P - P_{ext}}{\rho} \right)^{1/2}. \quad (1.7)$$

Ebben az esetben a megoldás nem egy hatványfüggvény. A másik probléma a táguló buborék impulzusa. Amikor ez számottevő, akkor az egyenlet valóban

$$\frac{d(4\pi R^3 v \rho / 3)}{dt} = 4\pi R^2 (P - P_{ext}). \quad (1.8)$$

A buborék adott sugár esetében gyorsabban mozog az impulzusa miatt, mint impulzus nélkül. A mágneses tértől és az ütköző gázok állapotegyenletétől függően ugrások lehetnek a gázok állapotában. Ezekből látható, hogy mennyire fontos szerepet játszik a külső nyomás abban, hogy megmondhassuk azon buborékok arányát, amelyekben a nyomás szignifikánsan nagyobb a külső nyomásnál. Mindegyik buborékra van egy  $R(t)$  és  $P(R)$  függvény, amelyek átvihetők egy  $P(t)$  megoldásba. Így létezik egy  $V(P)$  függés is, ami a térfogat nyomásfüggését adja meg. Egy  $n_0$  buborékképződési ráta mellett

$$n(P)dP = n_0 dt. \quad (1.9)$$

Így  $n(P) \propto dt/dP$ -vel, a térfogat kitöltési faktor pedig  $f(P) = n(P)V(P)$ . HII régiók esetében tehát  $f(P) \propto P^{-4,17}$ , csillagszél esetében  $f(P) \propto P^{-4,5}$ , szupernóváknál pedig  $f(P) \propto P^{-5,2}$ . Összességében hozzávetőlegesen  $f(P)dp \propto AP - 4,5dP$  egy valamilyen

A konstans mellett. Ha a teljes térfogatot buborékok töltik ki, akkor  $1 = \int f(P)dP$  és az átlagos nyomás kapcsolata a minimum nyomással  $P_{ave} = 1,5 \times P_{min}$ . Ez azt jelenti, hogy

$$f(P) = \frac{1,15(P/P_{ave})^{-4,5}}{P_{ave}}. \quad (1.10)$$

Ebből következően annak a valószínűsége, hogy bármelyik buborékban a nyomás tízszeresen meghaladja az átlagot,  $f(P > 10P_{ave}) = 0,31 \times 0,1^{3,5} \sim 10^{-4}$ . Hasonlóan,  $f(P > 2P_{ave}) \sim 0,03$ . Ezek alapján a HII régiók, csillagszelek és szupernóvák lökéshullámainak nyomása az élekciklusuk túlnyomó részében az átlagos ISM nyomás kétszerese alatt van. Emiatt a külső nyomás rendkívül fontos. Kim, Balsara & Mac Low (2001) numerikus szimulációk alapján szintén azt kapták, hogy a nyomás az átlagos kétszeresén belül maradt az időskála nagy részében. A nyomás eloszlásának vizsgálata szintén azt mutatja, hogy a nagy nyomású folyamatok többnyire kis méretűek és rövid ideig élnek. Így aztán a csillagoktól származó nagy nyomás csak a csillag közelében helyezkedhet el. Az óriási IR és HI héjak többsége az impulzusmegmaradás miatt nőhet nagyra. Tehát a héjak fizikai mérete lehet kicsi és nagy is, függően a nyomástól és a külső sűrűségtől. Egy alacsony, vagy átlagos sűrűséggel rendelkező környezetben a héj mérete pár száz pc is lehet.

### 1.3. Csillagkeletkezés, a korai csillagfejlődés állapotai

A csillagok elhelyezkedése és a tömege szorosan összefügg a csillagközi felhők dinamikai jellemzőivel. Lökéshullám által létrehozott sűrűségfluktuációk gravitációs kollapszusból születnek, mely lökéshullámok a molekulafelhőkben megfigyelhető szuperszonikus turbulencia által jönnek létre (Mac Low & Klessen, 2004, McKee & Ostriker, 2007). Amikor egy gázcsomó gravitációsan instabillá válik, elkezd összehúzódni, és a középponti sűrűség erőteljesen megnő. A kis tömegű csillagok keletkezésének egyik legegyszerűbb,  $\infty$  homogén izotróp közeget feltételező elmélete szerint ha a csillagközi felhő tömege nagyobb egy kritikus tömegnél:

$$M(\phi) = \frac{\phi}{2\pi G^{1/2}}, \quad (1.11)$$

ahol  $\phi$  a mágneses fluxus és  $G$  a gravitációs konstans, akkor megindulhat a felhő összehúzódása. Az “inside-out” (Shu, 1977) összehúzódás során egy expanziós hullám halad hangsebességgel a mag középpontjából kiindulva. A hullámban található anyag a centrum felé mozdul el, eközben a centrumhoz közeli anyag szabadeséssel hullik a magba. Az expanziós hullámban lévő tömeg fele a magban található, míg a másik fele a behulló burokból. Megfigyelések utalnak arra, hogy nem elhanyagolható szerepe van a kis tömegű csillagok keletkezésében a külső hatásoknak. Ilyen külső hatásokat figyeltek meg

HII zónák környékén (pl. Snider és mtsai. 2006, Zavagno és mtsai. 2007, M. Pomarés et al, 2009) és egy Orionban található OB asszociáció közelében is (Lee & Chen, 2007).

A nagy tömegű csillagok kialakulása numerikus szimulációk alapján (Bonnell és mtsai. 2004) nem szimplán a kis tömegű csillagok keletkezésének felskálázott változata. A kialakuló nagytömegű csillag tömege nem csupán annak a felhőmagnak a tömegétől függ, amelyben keletkeznek, hanem a környezetében található kisebb magok számától is, mivel fejlődése során tömeget akkretálhat a csoportja többi tagjától, ezáltal a végső tömeget az határozza meg, hogy hány tagú csoporton belül helyezkedik el. Emellett magyarázat lehet egy erős, hirtelen külső hatás, ami lökéshullám formájában gerjeszti a csillagkeletkezést (Elmegreen & Lada, 1977), vagy felhők ütközése is (Loren, 1976).

A GMC-kben megfigyelhető csillagkeletkezés különbözőségének magyarázata az őket körülvevő környezeti tényezők tulajdonságaiban rejlik. Ezek a fizikai paraméterek határozzák meg a keletkező csillagok tömegét és a csillagok körül kialakuló protoplanetáris diszkek tulajdonságait is. A nagy skálákon megfigyelhető sűrűségkontraszt az izotermális gáz Mach-számával négyzetesen arányos, vagyis  $\mathcal{M} \approx 10$  esetében nagyjából 100-szoros sűrűségkülönbséget várunk. Ez jól megfigyelhető a GMC-k és a felhőmagok sűrűségbeli eltéréseiben. Ha a felhőmagokat, a csillagok, csillagcsoportok keletkezési helyét vizsgáljuk meg nagyobb felbontás mellett, akkor szintén azt látjuk, hogy  $\mathcal{M}$  értékében ötszörös eltérés is lehetséges, ami átlagosan 25-szörös sűrűségkülönbséget jelent. A turbulencia miatt ezek a csillagkeletkeztető magok kisebb részekre bomlanak, és különböző tömegű csillagokból álló halmazok keletkeznek ahelyett, hogy egy óriási csillag keletkezne. Ezt a folyamatot hívjuk gravoturbulens fragmentációnak (Klessen, 2011).

Amikor a felhőmag a gravitáció hatására elkezd összehúzódni, akkor még a saját termális sugárzása számára is átlátszó az anyaga, vagyis az összehúzódási folyamat izoterm. Később azonban, amikor a magba hulló anyag már eléggé sűrűvé válik, többé nem lesz átlátszó az infravörös hullámhosszakon, és a hőmérséklet, valamint a nyomás elkezd nőni. Bizonyos idő elteltével kialakul az első mag, amely tipikusan pár század  $M_{\odot}$  tömegű és pár csillagászati egység nagyságú. Ekkor a mag egyensúlyban van. Főként molekuláris hidrogén alkotja, azonban a folyamatosan növekvő hőmérséklet és a behulló anyag miatt a hidrogén molekulák disszociálnak. Innentől a felszabaduló energia már nem a hőmérséklet növekedésére fordítódik, hanem további molekulák disszociációjához vezet. Ez az egyensúly felborulásához vezet, ami miatt a mag hirtelen összeroskad és kialakul a protocsillag.

A protocsillag hőmérséklete kb.  $10^5$  K, a tömege pár tized  $M_{\odot}$ , mérete pedig néhány  $R_{\odot}$ . A gravitációs kollapszus megkezdődése után nagyjából 10 ezer évvel jönnek létre. Mivel a felhőmag perdülete már kezdetben is nullától különböző volt, ezért a behulló anyag nem tud egyenesen a protocsillag felszínére hullani, hanem egy korong-szerű képződményt alkot, amelyben az anyag lassan spirálózva halad befelé. Ekkor még a csil-

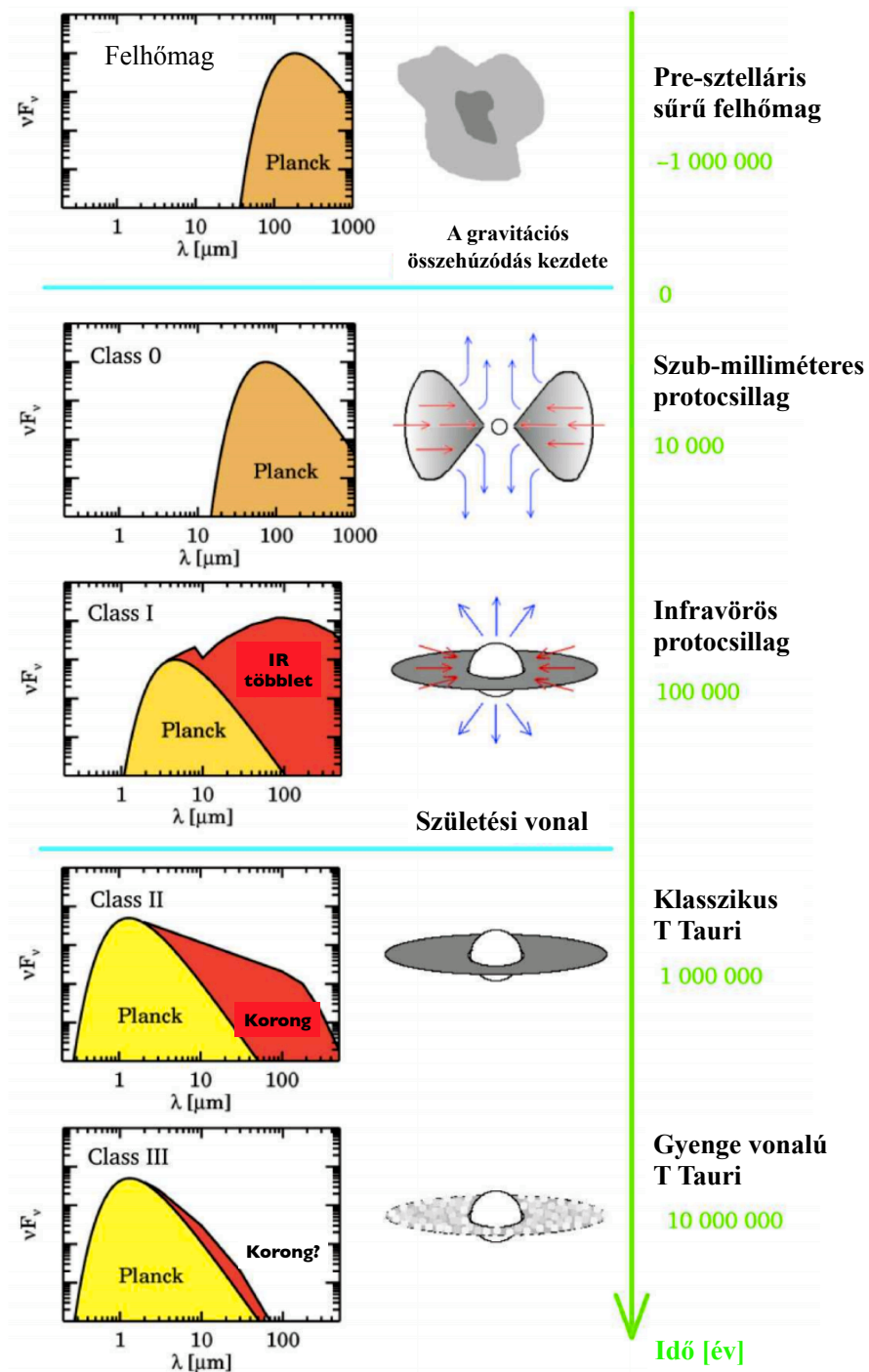
lag és a korong is egy burokba van mélyen beágyazva - ebben az állapotban hívjuk a protocsillagokat "Class 0" objektumoknak.

A korong anyagából történő akkréció során kialakulhatnak bipoláris kifújások. Ennek következményeként a csillag pólusai irányából anyag távozik, amely magával visz anyagot a burokból is. Ekkor, kb.  $10^5$  évvel a kollapszus beindulása után tekintjük a protocsillagot "Class I" objektumnak. Ha  $2 M_{\odot}$  alatti tömeggel rendelkezik, akkor T Tauri csillagról beszélünk, 2 és  $8 M_{\odot}$  között pedig Herbig Ae/Be csillagról.

Amikor a környező burok már nem tud több anyagot szolgáltatni a csillagnak, az akkréciós ráta folyamatosan csökkenni kezd. A csillagról kiáramló csillagszél a korongon kívül található összes anyagot elfújja, a korong pedig passzívvá válik. A korong fő energiaforrása többé nem az akkréció, hanem a középponti csillagból származó sugárzás. Nagyjából 1 millió év után következik be ez az állapot, ekkortól az objektumot "Class II" típusúnak tekintjük.

Végül, amikor a korong anyagát alkotó gáz és por nagy része szétoszlik, vagy nagyobb testek alakulnak ki koagulációval, "Class III" típusú objektumról beszélünk. A korong belső részének anyaga pár millió év alatt tűnik el, míg a külső korong még több tíz-, vagy százmillió évig is fennmaradhat.

A különböző stádiumokhoz tartozó spektrális energiaeloszlást (SED) a 1.2. ábra mutatja. Ahogy látható, ezeknek a fősorozat előtti objektumoknak a spektruma nagyon összetett, mivel a csillag sugárzásán kívül a korong és burok sugárzását is észleljük. Ezek sugárzása dominál az infravörös és szub-mm-es hullámhosszakon. A felhőmagok kizárólag a szub-mm-es tartományban észlelhetők, míg a Class 0 objektumok már a távoli-infravörösben is. A Class I objektumok SED-jében a csillag többnyire közeli-infravörös sugárzása mellett nagyon jelentős közép- és távoli-infravörös többletet ad a korong és a burok. A Class II objektumok esetében a csillag már a látható tartományban is megfigyelhető, de a spektrum infravörös részét még mindig a korongból érkező többlet dominálja. A Class III típusú objektumok azonban már alig mutatnak infravörös többletet. Robitaille és mtsai. (2006) radiatív transzfer modellek segítségével 200 000 SED-t létrehozva azt találták, hogy az  $\alpha$  spektrálindex és az ez alapján történő Class I/II/III klasszifikáció bizonyos esetekben félrevezető lehet, mert az  $\alpha$  értéke nem mindig mutat egyértelmű összefüggést a fejlődési fázissal. Az általuk definiált "Stage" klasszifikáció hasonló a "Class" klasszifikációhoz, azonban közvetlenül a fejlődési állapotra utal. Dolgozatomban azonban nem foglalkoztam a fejlődési fázisok modellezésével, csak bizonyos esetekben az  $\alpha$  érték kiszámításával, így a "Stage" helyett a "Class" klasszifikációt használok.



1.2. ábra. A protocsillagok különböző fejlődési stádiumai és az azokhoz tartozó spektrális energiaeioszlás a hullámhossz függvényében (Ábra: Kóspál Ágnes, 2009). A fejlődés során egyre csökken a megfigyelhető infravörös többlet.

## 1.4. Csillagkeletkezés a buborékok falában

A táguló buborékokban történő csillagkeletkezés feltétele, hogy a lökéshullám frontja mögött különböző természetű instabilitások lépjenek fel, amelyeket kinematikai, mágneses és gravitációs folyamatok irányítanak. Ezek közül néhány felkeveri a gázt, kis méretű turbulenciát hozva létre. Ezen kívül a feltorlódott anyagban a gravitációs instabilitás nagy csomókat hozhat létre, amelyekben beágyazott halmazok alakulhatnak ki. A fő mechanizmusokat szemlélteti az 1.3. ábra (Deharveng és mtsai. 2010). Ezek sorrendben a következők: 1) kis mértékű gravitációs instabilitások; 2) nagy mértékű gravitációs instabilitások, amik nagytömegű fragmentációhoz vezethetnek; 3) ionizáló sugárzás, amely turbulens közegre hat; 4) sugárnyomás hatására összehúzódó sűrű felhőmagok.

Az 1) esetben beszélhetünk a Jeans instabilitásról (részletes leírás pl. Whitworth és mtsai. 1994). Egy buborékhéjjal párhuzamos,  $L$  lineáris méretű elem tömege felírható így:  $M \sim L^2 \Sigma_h$ , ahol  $\Sigma_h$  a héj felületi sűrűségének értéke. Ha a héjakkal párhuzamos mozgásokat feltételezünk, akkor a szabadesési időskála  $t_{sze} \sim (G \Sigma_h L^{-1})^{-1/2}$ . Akkor beszélhetünk Jeans-instabilitásról, hogy ha a szabadesési időskála értéke kisebb, mint a hangsebességből adódó áthaladási idő, vagyis  $t_{sze} < L/a_h$ , ahol  $a_h$  az izotermális hangsebesség.

A 2) esetben a nagyskálájú instabilitások nagytömegű fragmentumokat, csomókat hozhatnak létre, amelyek valószínű helyei a nagytömegű csillagok keletkezésének. Ez más néven a "collect & collapse" folyamat (Elmegreen & Lada 1977). Egy OB spektráltípusú, nagytömegű csillag Lyman kontinuum sugárzása miatt kialakuló lökéshullám ionizációs és disszociációs frontja között a gázréteg gravitációsan instabillá válik, ahogy a lökéshullám terjed. Ennek a gázrétegnek a sűrűsége olyan nagy, hogy szinte azonnal új csillaghalmazok alakulnak ki benne. A csillaghalmazokban kialakulhatnak új OB csillagok is. Ez az előzőhöz hasonlóan újabb nyomás- és lökésfrontokat hozhat létre, és így új csillagok egész sorozata születhet.

A 3) esetben az ionizáló sugárzás egy turbulens közegre hat, és különös alakzatokat, pilléreket hozhat létre. Gritschneder és mtsai. (2010) nagyfelbontású szimulációk segítségével vizsgálták nagytömegű O csillagok hatását a turbulens CsKA-ra. A forró csillagok sugárzása áthatol a CsKA-on és hatékonyan melegíti fel a hideg, kis sűrűségű gázt, a kezdeti turbulencia által kialakított sűrűbb magok további sűrűsödését pedig elősegíti. A turbulens energia egy ilyen közegben akár négyszeresére is nőhet a sugárzás hatására, amely a pillérek csúcsán a gravitációs kollapszust szintén segíti. Ez kistömegű csillagok keletkezéséhez vezethet. A turbulencia spektrumának fejlődése azt is megmutatta, hogy az O csillagok UV sugárzása valóban befolyással van a környező molekulafelhő turbulenciájára. Az ionizáló sugárzás másik hatása lehet a 4) esetben, hogy a már létező, kialakult sűrűbb régiók összehúzódását elősegíti az ionizált gáz nyomása.







## 2. fejezet

# A C3PO eloszlásának vizsgálata

A csillagkeletkezéssel kapcsolatos legtöbb tanulmány a Naprendszerhez közeli, vagy a Tejútrendszer fősíkja közelében elhelyezkedő csillagkeletkezési területekre fókuszált. A korábbi, infravörös hullámhossztartományokat megfigyelő űrtávcsövek, mint az IRAS (Neugebauer és mtsai. 1984), vagy az AKARI (Murakami és mtsai. 2007) feltérképezték a teljes égboltot a csillagközi felhők egyik nyomjelzője, a por sugárzása után kutatva. Ezek többnyire a meleg por sugárzását érzékelték, amely ebben az esetben 20 K körüli hőmérsékletet jelent. A legsűrűbb felhőmagok azonban, különösen azok, amelyekben csillagok is keletkezhetnek, még ennél is hidegebbek. Ez azt jelenti, hogy nem elég a  $100\ \mu\text{m}$  körüli hullámhosszal rendelkező távoli-infravörös tartományt megfigyelni, hanem ennél is hosszabb hullámhosszakra van szükség. A Planck űrtávcső (Tauber és mtsai. 2010)  $350\ \mu\text{m}$  és 10 mm közötti tartományban elsőként végzett teljes égboltfelmérést, és szolgáltatott olyan adatokat, amely alapján a teljes égbolton megfigyelhetőek a hideg, sűrű csillagközi felhőcsomók.

### 2.1. A Planck űrtávcső

A Planck az Európai Űrügynökség (ESA) által épített űrtávcső. Fő célja, hogy kozmológiai kérdésekre segítsen választ adni. 2009. május 5-én bocsátották fel egy Ariane 5 hordozórakéta segítségével. A Planck  $\sim 1,5$  millió km-es távolságban keringett a Nap körül, a Nap-Föld rendszer L2 Lagrange pontjában. Az érzékelő műszerek adatait a 2.1. táblázatban foglaltam össze. Ahogy a táblázatból látható, a szögfelbontás egy hullámhosszon sem haladja meg az 5 ívpercet, így a Planck adatok segítségével olyan kompakt molekulafelhők és globulák azonosítása lehetséges, amelyek mérete nem haladja meg a 20 ívpercet és a bennük lévő por színhőmérséklete kisebb, mint 20 K. Korábban a COBE FIRAS és DIRBE felmérések  $7^\circ$  és  $0,7^\circ$  felbontás mellett kiterjedt, hideg porból álló komponenszt találtak a Tejútrendszerben. Ez a sugárzás a nagyszámú hideg magból érkezik. A Planck műhold egy tipikusan  $11\ M_\odot$  magot még  $\sim 6$  kpc távolságból is képes

detektálni.

2.1. táblázat. *A Planck űrtávcső érzékelő műszereinek adatait összefoglaló táblázat.*

	LFI			HFI					
Középhullámhossz [mm]	10	6,8	4,3	3	2,1	1,4	0,85	0,55	0,35
Sávszélesség ( $\Delta\nu/\nu$ )	0,2	0,2	0,2	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Szögfelbontás (ívperc)	33	24	14	10	7,1	5,0	5,0	5,0	5,0

## 2.2. C3PO

### 2.2.1. Cold Cores projekt

A Cold Cores projekt a csillagkeletkezés legkorábbi fázisait tanulmányozza. Feladata a Planck és Herschel űrtávcsövek mérései alapján az eddig ismeretlen hideg, sűrű felhőmagok azonosítása, a csillagkeletkezés körülményeinek, kiváltó okainak részletes vizsgálata, valamint a folyamat leírása. A nemzetközi kutatócsoportnak tagja számos finn, francia, német, olasz, angol és amerikai kutató. Az ELTE Csillagászati Tanszékének kutatócsoportja is a kezdetektől fogva részt vett a munkában. A magyarországi feladatok közé tartozik többek között a hideg magok nagyléptékű eloszlásának a vizsgálata, a Herschel űrtávcső mérési célpontjainak meghatározása, a Herschel mérések feldolgozása, a fiatal csillagok azonosítása és klasszifikációja, valamint a felhőmagok fizikai paramétereinek és a csillagkeletkezésnek a vizsgálata.

### 2.2.2. A hideg felhőcsomók katalógusa

A Cold Clump Catalog of Planck Objects (C3PO, Planck Collaboration, 2011) a Planck űrtávcső mérései alapján létrejött, a hideg objektumok első, teljes égboltot lefedő katalógusa. A Planck 3 legnagyobb frekvenciájú méréseit (857, 545 és 535 GHz) és IRAS méréseket kombinálva 10342 db olyan objektum található a katalógusban, amelyek kiemelkedően hidegebbek a környezetüknél. A katalógus tartalmaz becsléseket a hideg csomók hőmérsékletére, távolságára, tömegére, sűrűségére, fényességére, stb. Azt, hogy valóban hideg felhőcsomókról van szó, jól mutatja, hogy a katalógus objektumainak átlagos becsült hőmérséklete mindössze 13,7 K. Az objektumok szögkiterjedése átlagosan 3,5 ívperc. Az átlagos becsült oszlopsűrűség ( $N(\text{H}_2)$ ) értéke  $9,1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ , átlagos tömegük pedig 700 naptömeg. A C3PO nagy jel/zaj arányú detektálásai alapján elkészült egy publikus felhőmag-katalógus is. Az ECC (Early Cold Core sample, ld. 2.2. ábra) a 915 db legerősebben detektált objektum adatait tartalmazza.

## 2.3. A C3PO nagyléptékű eloszlásának vizsgálata

A Planck által detektált távoli-infravörös és szub-milliméteres méréseken (2.1. ábra) megfigyelhető a Tejútrendszerben található hideg por és gáz eloszlása. A legnagyobb, galaktikus skálán nézve a hideg CsKA a Galaxis fősíkjában koncentrálódik. A fősíkot alkotó spirálkarokat és az azok közötti teret nem egyenletesen tölti ki, a spirálkarokban ugyanis nagyobb mennyiségű anyag található. Kisebb skálákat tekintve a hideg por az óriás molekulafelhők sűrűbb részein található meg, amelynek eloszlását nagyban befolyásolják a bevezetőben is bemutatott dinamikai folyamatok. Ennek köszönhető, hogy az eloszlásban íveket, láncokat, buborékokat figyelhetünk meg.

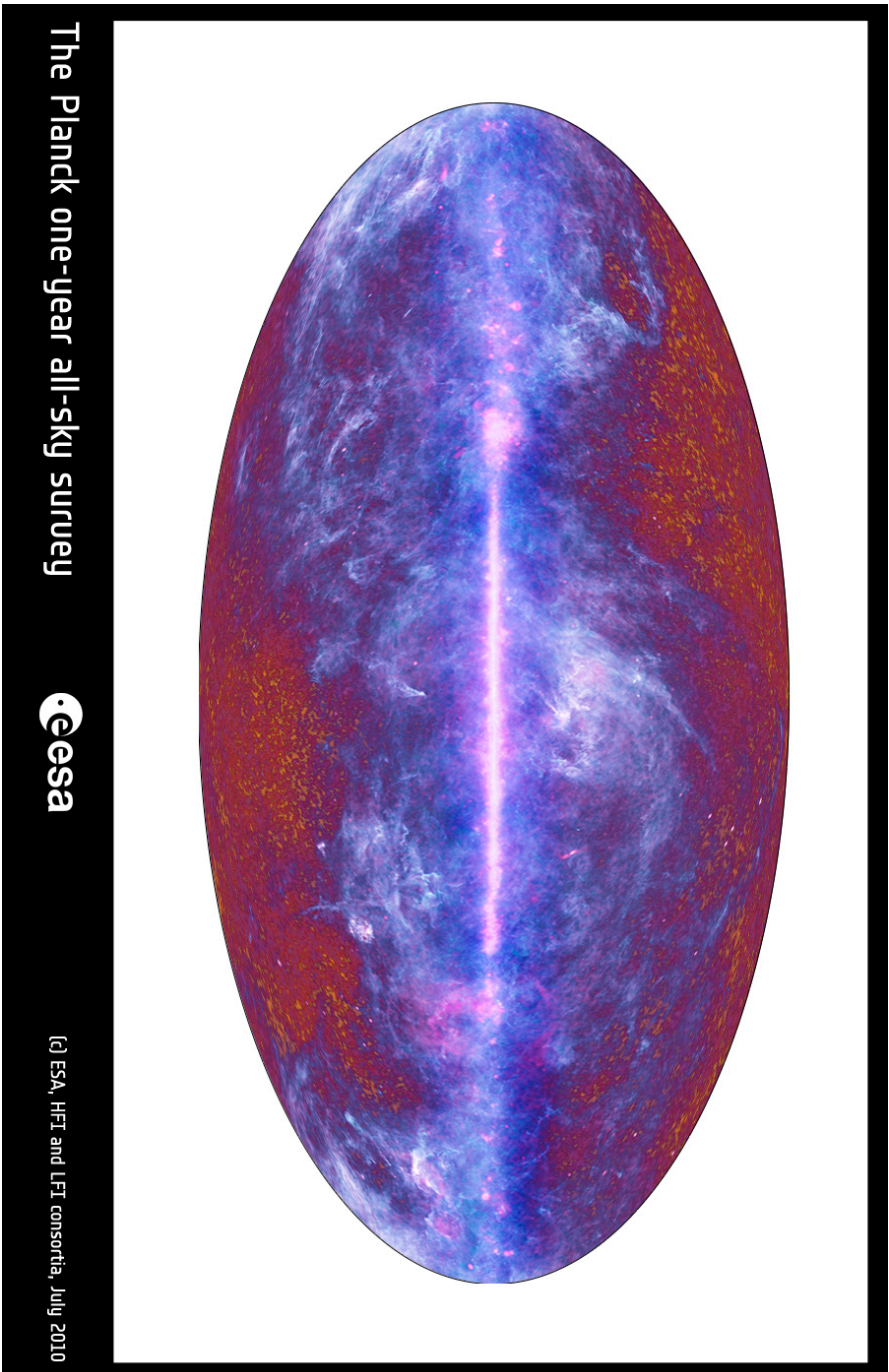
Ehhez nagyon hasonló alakzatokat formál a hideg magok eloszlása is (ld. 2.2. ábra), ezért érdemes volt megvizsgálni, hogy követik-e a galaxisunkban már korábban felfedezett buborékszerű képződmények eloszlását, azok morfológiáját. Három különböző területre vetítve vizsgáltam: 1) IN - a hurkokat, buborékhéjakat reprezentáló illesztett ellipsziseken belülré eső égi területek, 2) ON - az ellipszisek által lefedett égi területek és 3) OFF - az összes többi terület, amelyek minden ellipszisen kívül esnek. A későbbi ábrák színekódolásában a piros szín jelenti az ON területeket, a narancssárga az IN területeket, a kék pedig az OFF területeket.

Mivel a felületi sűrűségük kiemelkedően nagy a széles körűen tanulmányozott csillagkeletkeztető Taurus-Auriga-Perseus-Orion (TAPO) égi területen, ezért elsőként itt vizsgáltam a korrelációt. A kapott eredményeket összehasonlítottam a teljes égbolton kapott eredményekkel. Meg kell jegyeznem, hogy a konfúzió magas szintje miatt a galaktikus fősíkot és környezetét ( $|b| > 5^\circ$ ) nem vettem figyelembe a munka során, tehát ezt minden esetben kihagytam, akkor is, amikor a teljes égboltról esik szó.

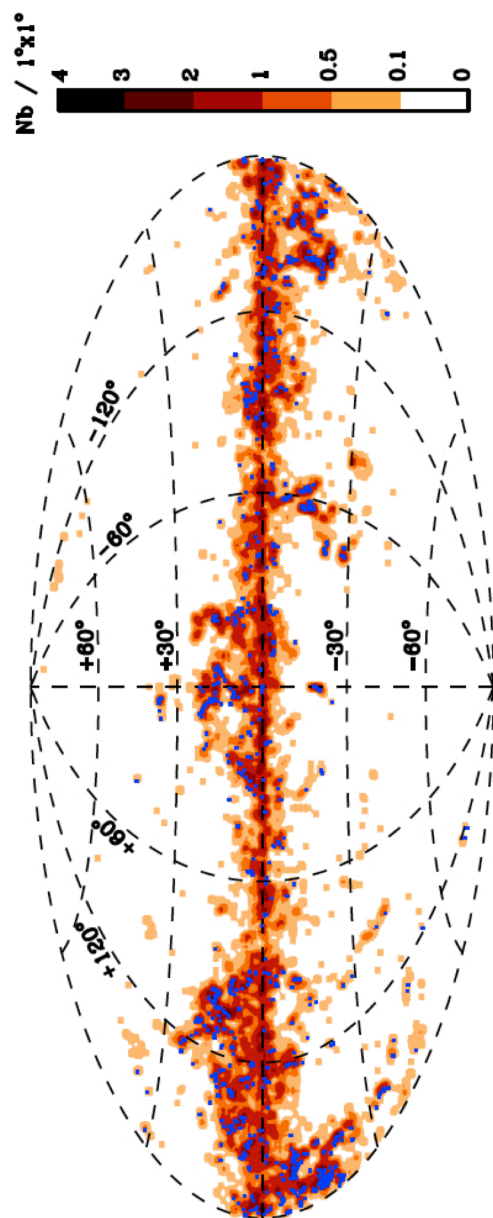
Az eredmények véletlenszerűségét 1000 db Monte-Carlo (MC) szimuláció segítségével teszteltem. Minden egyes MC szimulációban ugyanannyi forrás található, mint az eredeti katalógusban, ugyanolyan  $l, b$  határeloszlás mellett, 5 fokos felbontással.

### 2.3.1. Összevetés a HI héjakkal

Munkámban elsőként a Carl Heiles által 1984-ben publikált atomos HI alkotta héjak katalógusát használtam fel ahhoz, hogy statisztikus állításokat tegyek a felhőmagok határfelületen történő elhelyezkedését illetően. A katalógus Weaver & Williams (1973), valamint Heiles & Habing (1974) 21 cm-es hullámhosszú neutrális hidrogénvonalas mérései alapján készült (Heiles, 1984). A katalógusban a  $|b| < 10^\circ$  elhelyezkedő héjak találhatóak meg. Méret és távolságadatok 34 esetben elérhetőek. Az átlagos héjméret 0,82 kpc, az átlagos távolság pedig 6,1 kpc.



2.1. ábra. A Planck működésének első 12 hónapja alatt összegyűjtött mérésekből készült kompozit térkép a teljes égboltról. A térkép készítői mind a 9 mérési sáv adatainak segítségével készítették a képet, amely az ESA honlapjáról származik: [spaceimages.esa.int/Images/2010/07/The\\_microwave\\_sky\\_as\\_seen\\_by\\_Planck](http://spaceimages.esa.int/Images/2010/07/The_microwave_sky_as_seen_by_Planck)



2.2. ábra. A C3PO források felületi sűrűség eloszlása galaktikus koordináta-rendszerben,  $2^\circ$ -os felbontással. Az ECC katalógus forrásait kék pontok jelzik. (Planck Collaboration, 2011)

2.2. táblázat. A C3PO és a MC szimulációk felületi sűrűségének eloszlása a TAPO területen és a teljes égbolton, összevetésben a HI héjakkal.

Terület		C3PO	MC		
TAPO	IN	0,764	0,756	$\pm$	0,022
	ON	0,912	0,853	$\pm$	0,023
	OFF	0,792	1,058	$\pm$	0,054
Teljes égbolt	IN	0,184	0,175	$\pm$	0,002
	ON	0,322	0,238	$\pm$	0,005
	OFF	0,056	0,097	$\pm$	0,002

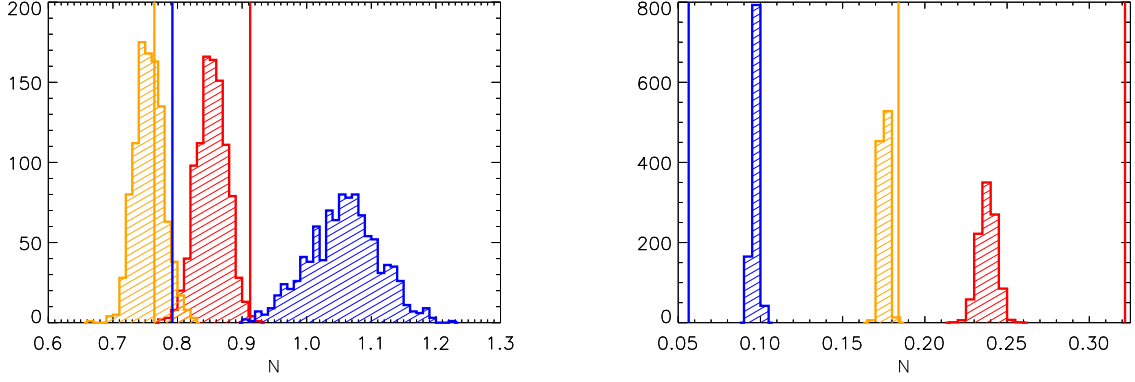
### A C3PO eloszlása a HI héjakon

A TAPO régióban 682 db (46%) hideg mag helyezkedik el ON pozícióban, 635 (43%) magot találtam IN pozícióban és 153 (11%) OFF pozícióban. Az eloszlást a teljes égbolton vizsgálva a következő eredményt kaptam: 1869 db (33%) ON, 2985 db (52%) IN és 873 db (15%) OFF elhelyezkedésű mag található.

Az eredmények véletlenszerűségét a már korábban említett MC szimulációk (ld. 2.3. fejezet) segítségével vizsgáltam. A megfigyelt és a szimulált felületi sűrűségről részletes leírást ad a 2.2. táblázat. Az eloszlásokat szemlélteti a 2.3. ábra, ahol a hisztogramok a szimulált mintákban kapott értékek eloszlását mutatják, míg a függőleges vonalak a C3PO esetében megfigyelt értékeket. A szimulált felületi sűrűségek eloszlásából számított szórást (ezentúl  $\sigma$ ) használom a szignifikancia mérésére. A TAPO terület esetében azt találtam, hogy a héjakon (piros) mért többlet értéke  $3\sigma$ , míg a teljes égbolt esetében kapott többlet értéke ennél jóval magasabb,  $15\sigma$ . Ezek alapján kijelenthető, hogy a HI héjakon megfigyelhető többlet szignifikáns a véletlen eloszlásokból kapott átlagos felületi sűrűség értékéhez képest.

#### 2.3.2. Összevetés a távoli-infravörös hurkokkal

A Planck által detektált hideg csomók eloszlását összevetettem a távoli-infravörös tartományban intenzitástöbbletet mutató IRAS Galaktikus Infravörös Hurkok (Galactic InfraRed Loops - GIRLs, Könyves és mtsai. 2007) eloszlásával is. A már korábban említett távoli-infravörös hurkok nagy skálájú képződmények, és egy globális, nagyskálájú struktúrákat kutató vizsgálat során a 60 és 100  $\mu\text{m}$  ISSA táblák (IRAS Sky Survey Atlas, Wheelock és mtsai.1994) segítségével végezték a katalogizálást. Ez a folyamat két lépcsőben történt, az első lépcsőben Kiss és mtsai. (2004) a második galaktikus negyedben találtak 145 db távoli-infravörös hurkot. Könyves és mtsai. (2007)-ben bővítették a katalógust a teljes égboltra, így összesen 462 db objektum paramétereit állapították meg. Definíció szerint (Tóth és mtsai. 1996) a hurkoknak környezetükhöz képest



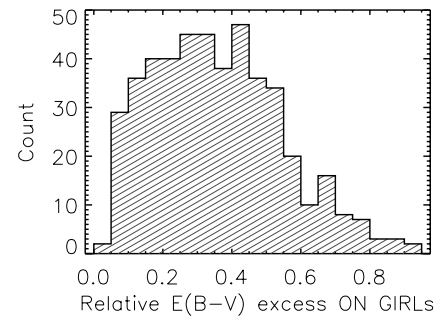
2.3. ábra. A C3PO és a MC szimulációk felületi sűrűségének eloszlása a TAPO területen (bal oldal) és a teljes égbolton (jobb oldal), összevetésben a HI héjakkal. Függőleges vonal jelöli a C3PO minta esetében számított értékeket, míg a hisztogramok az 1000 db MC szimulációban számított értékek eloszlását mutatják. Az IN (narancssárga) területeken a várhatóval közel megegyező, az OFF (kék) területeken a várhatónál jóval kisebb, az ON (piros) területeken a várhatónál nagyobb a megfigyelt felületi sűrűség mindkét esetben.

távoli-infravörösben intenzitástöbbletet kell mutatniuk és a hurkoknak egy teljes ellipszis legalább 60%-át ki kell rajzolniuk. Ez több módon lehetséges: egy ellipszis része, elmosódott ellipszis vagy akár különálló intenzitásfoltok egy ellipszis mentén. A hurkok paramétereit az illesztett ellipszisek paramétereit adják meg.

Meghatároztam a relatív vörösödés mértékét a hurkok belsejében található minimum-hoz képest magukon a hurkokon, a következő képlet segítségével:

$$RE = \frac{\max(E(B-V)_{ON}) - \min(E(B-V)_{IN})}{\max(E(B-V)_{ON})}. \quad (2.1)$$

Ehhez 20' vastag koncentrikus gyűrűkben átlagoltam az  $E(B-V)$  értéket Schlegel és mtsai. (1998) IRAS/ISSA és COBE/DIRBE mérések alapján készített  $E(B-V)$  teljes égbolt térképei alapján. A 2,4' méretű pixelek miatt egy ilyen vastag gyűrűben már megbízható átlagot kaptam. A kapott többlet átlagosan 32%-nak adódott. A legkevésbé szignifikáns hurok esetében ez az érték 3%, míg a leginkább szignifikáns hurok esetében 92%. A hurko-



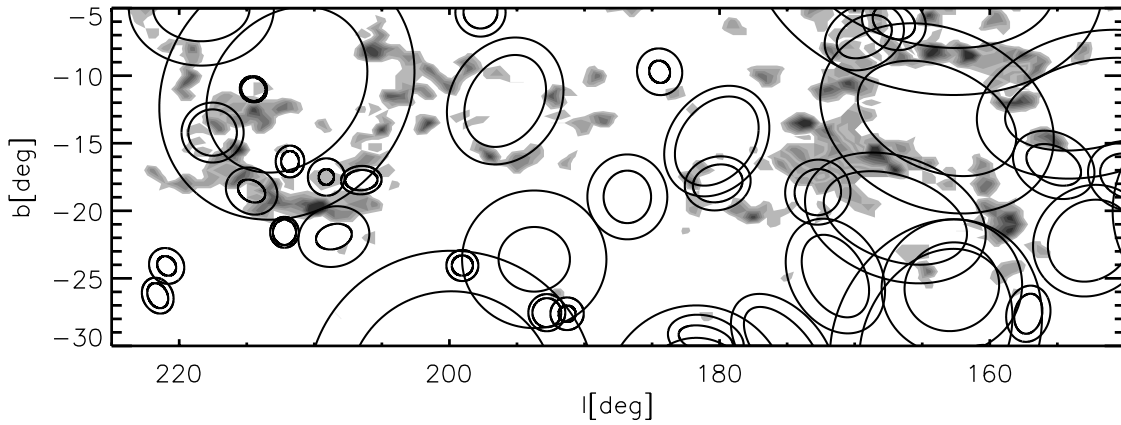
2.4. ábra. Relatív vörösödés többlet a távoli-infravörös hurkokon.

kon mért relatív vörösödés eloszlása a 2.4 ábrán látható. A katalógus online verziója 74 hurok esetben tartalmaz méretet és távolságot. Az átlagos méret 0,09 kpc, átlagos

távolságuk pedig 1,1 kpc.

### A C3PO eloszlása az infravörös hurkokon

A 2.5. ábrán látható a C3PO magok felületi sűrűségének kontúrtérképe a TAPO égi területen. A fekete gyűrűk jelzik az infravörös hurkokra illesztett ellipszisek határát. Ezen a területen vizsgálva a magok hurkokhoz viszonyított eloszlását azt találtam, hogy 810 C3PO mag (a területen található összes mag 55%-a) ON területen található, tehát a hurkok irányában. 312 db magot (21%) találtam IN, azaz a hurkok belső területein. 348 db mag (24%) található OFF, tehát a hurkok közötti térben. Az analízist elvégeztem a teljes égbolton is. 1928 db (34%) magot találtam ON pozícióban, 877 db-ot (15%) IN pozícióban és 2922 (51%) magot OFF pozícióban.



2.5. ábra. C3PO felületi sűrűség a TAPO területen. A fekete gyűrűk az infravörös hurkok határait jelzik. A felületi sűrűség jól láthatóan nagyobb a hurkokon.

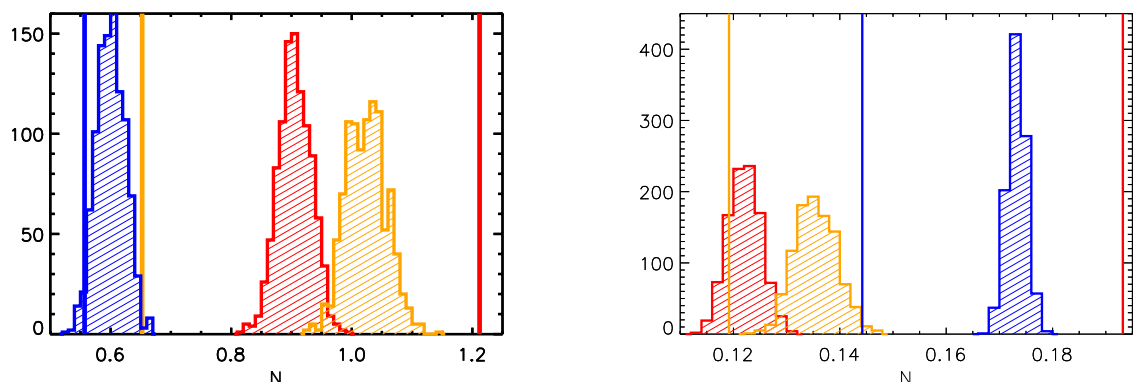
A kapott eredmények véletlenszerűségét ismét MC szimulációk segítségével teszteltem. A felületi sűrűség szimulációkkal való összevetését a 2.3. táblázat tartalmazza. A TAPO területen kapott eredményeket jól szemlélteti a 2.6. ábra bal oldala. A teljes égbolton történt összevetést a 2.6. ábra jobb oldala mutatja. Ahogy korábban is, a függőleges színes vonalak a C3PO mintából kapott, a hisztogramok pedig a MC szimulációkból kapott felületi sűrűség értékeket jelentik. A TAPO területen és a teljes égboltra végzett analízisben is szignifikáns többletet találtam a hurkokon megfigyelt felületi sűrűség értékében, a szimulációkkal összevetve. A TAPO esetében a megfigyelt és a szimulált felületi sűrűség átlagának különbsége az ON területeken  $11,3\sigma$ , míg a teljes égbolton ez a különbség  $23,7\sigma$ . Ez alapján kijelenthető, hogy a megfigyelt többlet szignifikáns.



2.3. táblázat. A C3PO és a MC szimulációk felületi sűrűségének eloszlása a TAPO területen és a teljes égbolton, összevetésben az infravörös hurkokkal.

Terület		C3PO	MC
TAPO	IN	0,6524	1,024 ± 0,033
	ON	1,212	0,906 ± 0,027
	OFF	0,557	0,600 ± 0,023
Teljes égbolt	IN	0,119	0,135 ± 0,004
	ON	0,193	0,122 ± 0,003
	OFF	0,144	0,173 ± 0,002

A C3PO és a szimulált minták eloszlását nem csak a teljes égboltra, hanem az egyes hurkokra levetítve is elvégeztem. A 427 db GIRL-ből 180 darabon találtam C3PO objektumot. Megvizsgálva azt, hogy az egyes hurkokon mekkora a szimulációk alapján várható felületi sűrűség, és hogy mekkora a C3PO felületi sűrűség, azt találtam, hogy 68 hurkon szignifikáns többlet megfigyelhető. A szignifikáns többletet a következő módon definiáltam: a teljes égbolton elvégzett számításhoz hasonlóan átlagoltam az 1000 db szimulációból adódott felületi sűrűséget az adott hurkon, valamint kiszámítottam ennek a szórását ( $\sigma$ ). Ha a C3PO felületi sűrűség magasabb volt, mint a szimulációs átlag plusz  $3\sigma$ , akkor ezt a többletet szignifikánsnak tekintettem.



2.6. ábra. A C3PO és a MC szimulációk felületi sűrűségének eloszlása a TAPO területen (bal oldal) és a teljes égbolton (jobb oldal), összevetésben az infravörös hurkokkal. Mindkét esetben az IN és OFF területeken a vártnál jóval alacsonyabb a felületi sűrűség, az ON területeken pedig magasabb.

### Az intersztelláris vörösödés és a C3PO felületi sűrűség összevetése a hurkokon

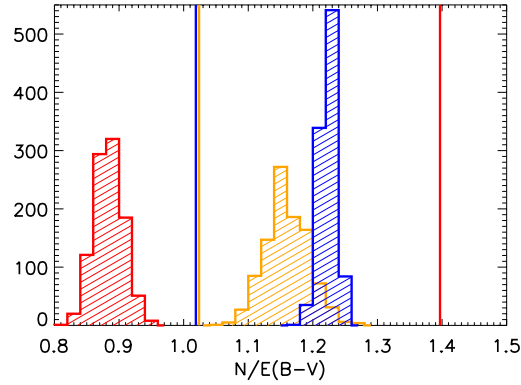
Az intersztelláris vörösödést a CsKA-ban található por és egyéb szemcsék okozzák. Az apró szemcséken a rövidebb hullámhosszú elektromágneses sugárzás jobban szóró-

dik, mint a hosszabb hullámhosszú. Emiatt az elméletileg megfigyelhető B-V színindex megváltozik, ha a csillag fénye keresztülmegy egy csillagközi port tartalmazó felhőn. Az így megmért vörösödés (továbbiakban  $E(B-V)$ ) alapján jól következtethetünk az adott irányban található por mennyiségére, ugyanis az extinkciós törvény alapján az abszorpció a következő formulával számítható:

$$A_V \simeq 3,1 \times E(B-V) \quad (2.2)$$

Az előző fejezetben már bemutattam, hogy az infravörös hurkokon az egyenletes eloszlásból várhatónál szignifikánsan több C3PO objektum helyezkedik el. A hurkok irányában azonban definíció szerint több por is található, ezért megvizsgáltam, hogy ezt a felületi sűrűség többletet csak a nagyobb mennyiségű por okozza-e, vagy esetleg ezen felül is láthatunk-e többletet.

A Schlegel és mtsai. (1998) által készített térképek minden pixeléről megállapítottam, hogy a hurkok valamelyikén helyezkedik-e el, a hurkokon belül, esetleg a hurkok közötti térben. Ez alapján kiszámítottam, hogy mekkora a hurkokon megfigyelhető átlagos  $E(B-V)$  többlet. Ezután a C3PO felületi sűrűséget elosztottam a kapott átlagos  $E(B-V)$  értékkel, így megkapva az arányukat (továbbiakban  $N/E(B-V)$ ). Ezt a számítást az 1000 db MC szimuláció mindegyikére szintén elvégeztem. Az IN, ON és OFF területekre kapott értékeket a már korábban leírt módon hasonlítottam össze annak érdekében, hogy megállapíthassam az eredmény szignifikanciáját.



2.7. ábra. A C3PO és a MC szimulációk esetében számított  $N/E(B-V)$  arány eloszlása a teljes égbolton, összevetésben az infravörös hurkokkal. Az ON területeken jelentős többlet figyelhető meg, míg az IN és OFF területek esetében hiány látható a várható értékekhez viszonyítva.

Az teljes égbolton elvégzett számítások eredményét a 2.7. ábra, valamint a 2.4. táblázatban foglaltam össze. Az IN területek esetében a várhatónál kisebbnek adódott a valós minta alapján számított  $N/E(B-V)$ , a különbség  $4\sigma$ . Az OFF területeken szintén nagyobb a várható  $N/E(B-V)$ , mint a megfigyelt, a különbség  $15,7\sigma$ . Az ON területek esetében, vagyis a hurkok által lefedett égi területeken a várható  $N/E(B-V)$  viszont jóval kisebb, mint a megfigyelt érték, a különbség  $23,3\sigma$ .

2.4. táblázat. A C3PO és a MC szimulációk esetében számított  $N/E(B-V)$  arány eloszlása a teljes égbolton, összevetésben az infravörös hurkokkal.

Terület	C3PO	MC		
IN	1,024	1,160	$\pm$	0,034
ON	1,397	0,884	$\pm$	0,022
OFF	1,019	1,223	$\pm$	0,013

## 2.4. A C3PO csomók tulajdonságainak eloszlása az infravörös hurkokon

### 2.4.1. Fizikai paraméterek a Planck mérések alapján

A C3PO katalógus a hideg csomók pozíciója és fényessége mellett számos becsült fizikai paramétert is tartalmaz. 3411 forrás esetében található távolságot, amelyekre tömeg- és  $H_2$  oszlopsűrűségbecslést is megad a katalógus.

A távolságadatok három módszer eredményeként adódtak. Az első módszer az ismert molekulafelhők távolságain alapul, a Dame és mtsai. (2001) CO térképek felhasználásával becsüli a távolságot. Ha a hideg csomó valamilyen, az adott régióra jellemző CO vonal alatti területtel rendelkező zónába esik, akkor nagy valószínűséggel asszociált az adott felhővel. Így 1152 távolságadatot lehetett megbecsülni. A második módszer a 2MASS (Skrutskie és mtsai. 2006) adatokon és a Besançon (Robin és mtsai. 2003) galaxismodellel alapul, megbecsülve a galaktikus extinkció háromdimenziós eloszlását. A feltételezett por eloszlás alapján megbecsülhető a hideg csomók távolsága. A módszerről bővebb leírást ad Marshall és mtsai. (2006, 2009). Ez a módszer 978 forrásra adott távolságadatot. A harmadik módszer a Sloan Digital Sky Survey alapján M1...M5 törpék fotometriáján alapul, a vörösödés-invariáns indexen keresztül:

$$Q_{gri} = (g - r) - \frac{E(g - r)}{ER - i}(r - i). \quad (2.3)$$

A  $Q_{gri}$  és a valódi  $g - i$  közötti kalibrációt a Covey és mtsai. (2007) publikációja alapján lehet megadni. A távolság-vörösödés profilt egy adott sugarú körön belülre eső csillagok vörösödésének mediánja alapján becsülik. A kör középpontja a hideg csomó középpontjára esik. A megfigyelt vörösödés-profilt egy modellre illesztik, ami egy közeli-mező+felhőprofil összege egy Gauss-szal konvolválva:

$$E(B - V)_{obs} = a + c \int_{-\infty}^{x-x_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma^2}\right) dt. \quad (2.4)$$

Az egyenletben szereplő  $x$  a független változó (távolsági modulus),  $x_0$  az adott felhő felhő pozíciója,  $a$  a közeli-mező vörösödése,  $c$  a felhővel asszociált vörösödés, a  $\sigma$  pedig a Gauss szélessége. Ezzel a módszerrel további 1452 forrás távolságát sikerült megbecsülni.

Az egyes távolságbecslési módszerek megbízhatóságát az alapján vizsgáltam, hogy az általuk adott távolságok különbsége ugyanazon felhőcsomókra mennyire eltérő. A felhőkomplexumok és az extinkció alapján számított távolságok átlagos eltérése 0,5 kpc. A felhőkomplexumok és az SDSS alapján becsült távolságok átlagos eltérése 0,08 kpc. Az SDSS és az extinkció segítségével számított távolságadatokat átlagos eltérése pedig 0,9 kpc a katalógus bejegyzései alapján.

A hideg csomók hőmérsékletét 4 sáv (IRAS 100  $\mu m$ , Planck 857 GHz, 545 GHz, 353 GHz) alapján készített spektrális energiaeloszlások segítségével számították. Az apertúrába eső fluxussűrűség egyes Planck sávokban mért átlagos hibája 16,9, 5,4 és 1,3 MJy/sr. A feltételezett emissziós modell egy módosított feketetest:

$$S_\nu = AB_\nu(T)\beta^\nu, \quad (2.5)$$

ahol  $S_\nu$  az  $\Omega_c = \pi\sigma_{Maj}\sigma_{Min}$  térszögben integrált fluxus,  $A$  az amplitúdó,  $T$  a hőmérséklet,  $\beta$  a spektrálindeks,  $B_\nu$  pedig a Planck-függvény. Az így számított hőmérséklet átlagos hibája 1,8 K.

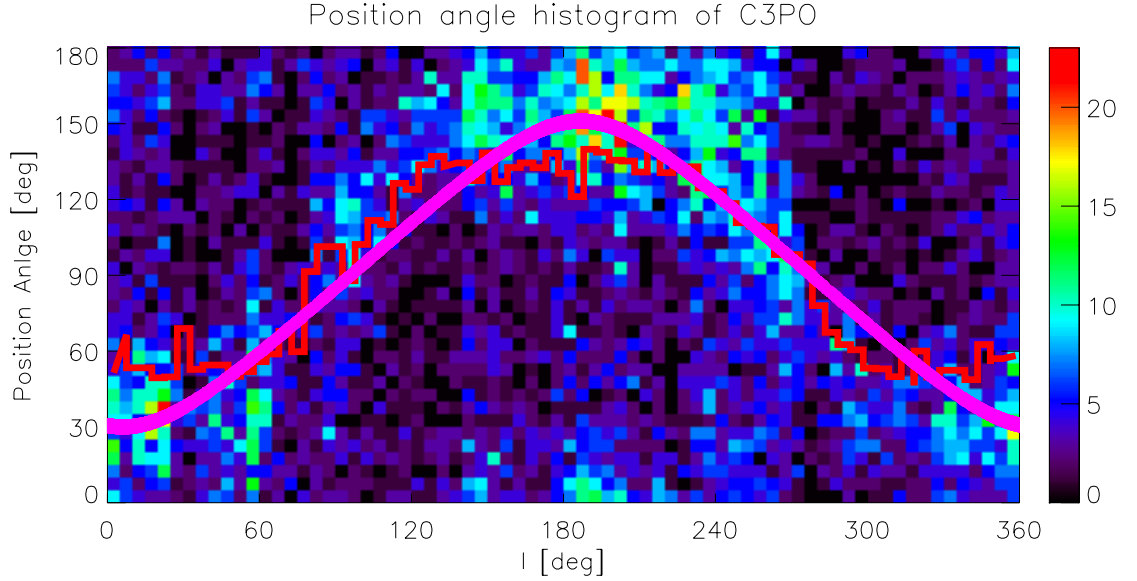
A források kiterjedését elliptikus Gauss illesztésekkel határozták meg, olyan képeken, amelyeket a 857 GHz-es mérések és az IRAS 100  $\mu m$ -es mérések hányadosaként kaptak. 3 paraméterrel írhatók le az illesztett Gauss profilok: a főtengely nagysága  $\sigma_{Maj}$ , a kistengely nagysága  $\sigma_{Min}$  és a pozíciószög  $\psi$ . A  $\sigma_{Maj}$ ,  $\sigma_{Min}$  és  $\psi$  hibája rendre 0,13, 0,12 ívperc, valamint 0.06 radián. Az adatokban azonban felfedeztem egy szisztematikus hibát, amely a Planck űrtávcső megfigyelési stratégiájának köszönhető. Az űrtávcső a teljes égboltfelmérést az ekliptika síkjára merőlegesen forogva végezte. A C3PO magok elnyúltsága erős korrelációt mutat a ezzel a mozgással (2.8. ábra).

A távolság, a kiterjedés és a hőmérséklet birtokában lehetséges volt megbecsülni az egyes hideg csomók átlagos oszlopsűrűségét:

$$N(H_2) = \frac{S_{\nu_0}}{\Omega_c \mu m_H \kappa_{\nu_0} \times B_{\nu_0}(T)}. \quad (2.6)$$

A fenti egyenletek alapján meghatározott fizikai paraméterekkel rendelkező források alapján megvizsgáltam, hogy felfedezhető-e valamilyen összefüggés a csomók hőmérséklete, tömege, sűrűsége, elnyúltsága és az infravörös hurkokhoz viszonyított elhelyezkedésük között. A mintát két részre bontottam a távolságadatokat alapján: az 1 kpc-nél kisebb becsült távolságú és az ennél nagyobb távolságú forrásokat külön vizsgáltam. Ahogy az előzőekben, úgy ez alkalommal is a  $|b| > 5^\circ$  területekre korlátoztam az analízist.

A tömegek eloszlását a 2.9. ábra felső sora mutatja, ahol a színkódolás megegyezik



2.8. ábra. A C3PO csomók pozíciósöge és a Planck megfigyelési szög összehasonlítása. A színskála a galaktikus hosszúság mentén 5 fokos sávokban, adott pozíciósöggel rendelkező felhőcsomók számát mutatja. Ennek az értéknek a mediánja látható piros vonallal kiemelve. A rózsaszín görbe mutatja az adott galaktikus szélességen az ekliptika látszó szögét  $+90^\circ$ -kal eltolva. A C3PO magok az ekliptika síkjára merőlegesen látszanak elnyúlni.

a korábban használttal. Az objektumok hőmérsékletének eloszlását a 2.9. ábra középső sora mutatja. Az oszlopsűrűségek eloszlása a 2.9. ábra alsó sorában látható. Minden esetben kiszámítottam az adott paraméter átlagos értékét és az átlagi körüli szórást. A kiszámított értékeket a 2.5. táblázat tartalmazza. Látható, hogy mind az 1 kpc-nél kisebb, mind az 1 kpc-nél nagyobb távolsággal rendelkező hideg csomók esetében a hurkok által lefedett, vagyis ON területen a tömeg és a sűrűség nagyobb, a hőmérséklet pedig kisebb, mint a többi területen. Ezek az eltérések azonban hibahatáron belül vannak, így statisztikusan nem lehet kijelenteni, hogy a csomók bármilyen fizikai paramétere szignifikáns eltérést mutatna az infravörös hurkokhoz viszonyított elhelyezkedésüktől függően. A csomókra illesztett ellipszisek ellipticitását a C3PO katalógusban szereplő kis- és nagy-tengelyek értékei alapján számítottam. Az 1 kpc-nél kisebb távolsággal rendelkező hideg csomók ellipticitásának átlaga semmilyen különbséget nem mutat, míg az 1 kpc-nél nagyobb távolságú hideg csomók esetében a ON pozíciójúak átlagosan elnyúltabbak, mint máshol, de a különbség ebben az esetben sem tekinthető szignifikánsnak.

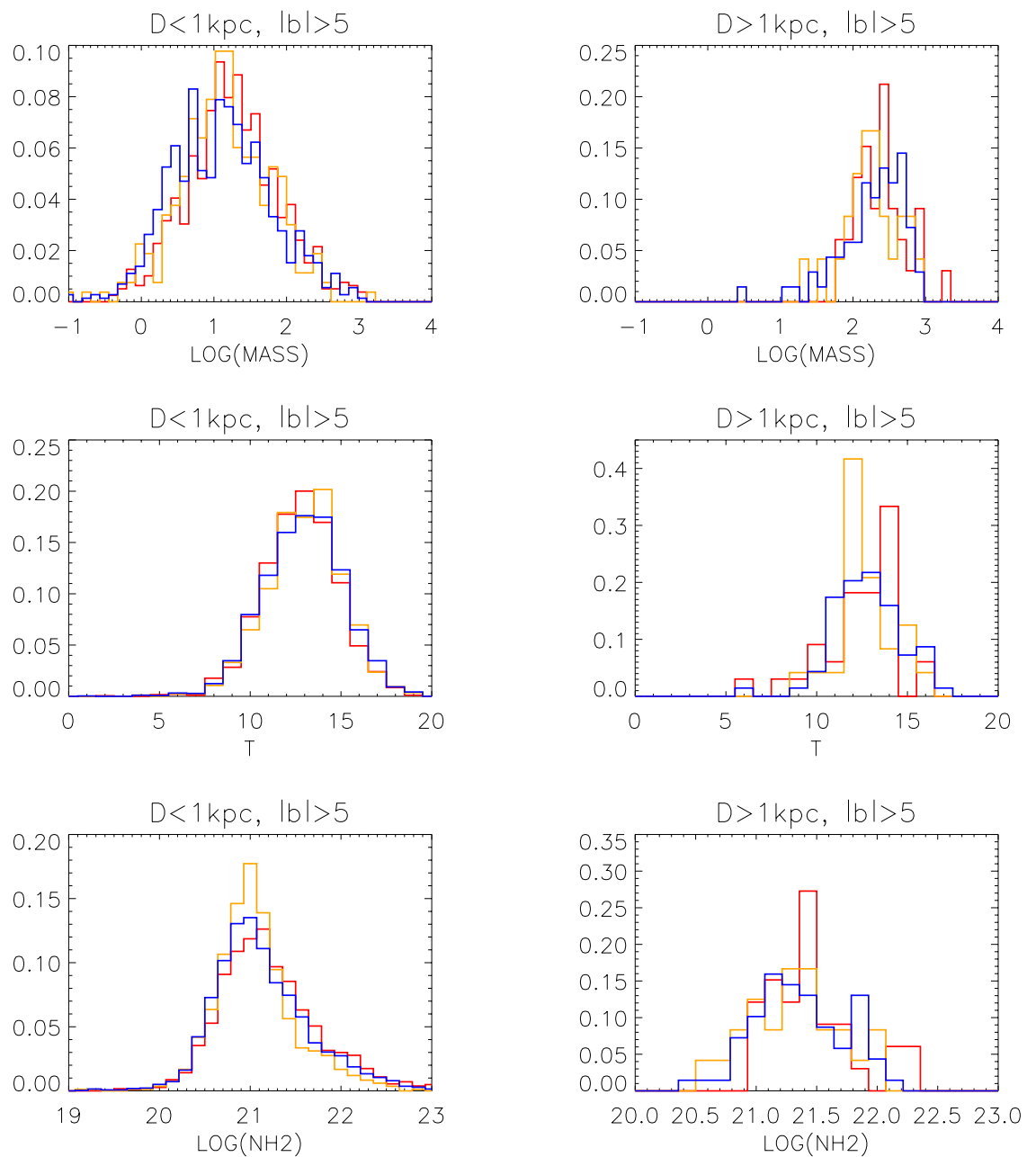
Ezek alapján kijelenthető, hogy a hideg felhőcsomók fizikai paramétereiben nem fedezhető fel különbség attól függően, hogy az adott csomó az IR hurkokhoz viszonyítva hol helyezkedik el.

2.5. táblázat. Az 1 kpc-nél kisebb és az 1 kpc-nél nagyobb távolsággal rendelkező C3PO objektumok fizikai paramétereinek átlagos értéke, valamint az átlag szórása az IN, ON és OFF területeken.

Terület	D<1 kpc	D>1 kpc
	Tömeg [ $M_{\odot}$ ]	
IN	44,4±19,7	287,8±206,8
ON	62,9±24,0	387,9±198,3
OFF	51,0±18,6	314,7±230,9
	Ellipticitás	
IN	0,8±0,13	0,7±0,20
ON	0,8±0,13	0,8±0,11
OFF	0,8±0,13	0,8±0,14
	Hőmérséklet [K]	
IN	13,6±2,0	13,2±1,7
ON	13,4±2,0	13,1±2,0
OFF	13,5±2,2	13,3±1,9
	$\log N(H_2)$ oszlopsűrűség [ $\text{cm}^{-2}$ ]	
IN	21,1±0,4	21,4±0,4
ON	21,3±0,5	21,5±0,4
OFF	21,2±0,5	21,4±0,4

#### 2.4.2. Fizikai paraméterek Herschel mérések alapján

A C3PO katalógus alapján kiválasztott  $\sim 120$  galaktikus mezőben végzett felméréseket a Herschel Űrtávcső a Planck+Herschel "Galactic Cold Cores" elnevezésű Open Time Key Project részére. A mezők kiválogatásánál elsődleges szempont volt, hogy széles tartományban fedje le a hőmérséklet, kiterjedés, tömeg és távolság paramétereket, illetve egymástól eltérő galaktikus környezetben vizsgálhassuk a hideg csillagközi felhőcsomókat. A Juvela és mtsai. (2012) által publikált 71 darab, a Herschel SPIRE műszere által 250, 350 és 500  $\mu\text{m}$ -en végzett mérés alapján vizsgáltam, hogy az egyes mezőkön azonosított hideg felhőmagok fizikai paraméterei különböznek-e attól függően, hogy hol helyezkednek el a porgyűrűkhöz képest. A 71 mezőben összesen 102 hideg magot azonosítottak, amelyeknek meghatározták a hőmérsékletét ( $T$ ), a maximális oszlopsűrűségét ( $N$ ) és a tömegét ( $M$ ). A hőmérsékletet és a tömeget meghatározták a mezőkben megfigyelhető háttér levonása után is ( $T^{bg}$ ,  $M^{bg}$ ). Az eredményeket a 2.6. táblázatban foglaltam össze. Ahogy látható, a C3PO fizikai paramétereinek eloszlásához hasonlóan a Herschel mérések alapján megállapított fizikai paraméterek sem mutatnak szignifikáns különbséget attól függően, hogy a hideg felhőmag az infravörös hurkokon, azok belsejében, vagy azokon kívül helyezkednek el.



2.9. ábra. Az 1 kpc-nél kisebb (bal oldal) és 1 kpc-nél nagyobb (jobb oldal) távolsággal rendelkező C3PO objektumok becsült tömegének (felső sor), hőmérsékletének (középső sor) és oszlopsűrűségének (alsó sor) egyre normált eloszlása az IN (narancssárga), ON (piros) és OFF (kék) területeken. A fizikai paraméterek eloszlásában nem látható jelentős különbség.

2.6. táblázat. A *Herschel SPIRE* műszerével megfigyelt hideg felhőmagok fizikai paramétereinek átlagos értéke, valamint az átlag szórása az *IN*, *ON* és *OFF* területeken.

Terület	$T$ [K]	$N$ [ $10^{21} cm^{-2}$ ]	$M$ [ $M_{\odot}$ ]	$T^{bg}$ [K]	$M^{bg}$ [ $M_{\odot}$ ]
IN	$14,7 \pm 0,5$	$10,2 \pm 2,8$	$111,0 \pm 18,2$	$13,2 \pm 1,3$	$42,1 \pm 7,0$
ON	$14,2 \pm 1,1$	$13,5 \pm 7,5$	$135,4 \pm 50,6$	$12,6 \pm 1,6$	$57,3 \pm 16,1$
OFF	$14,8 \pm 1,1$	$13,1 \pm 9,1$	$382,8 \pm 200,5$	$12,9 \pm 1,2$	$151,5 \pm 91,6$



## 3. fejezet

# Az AKARI FCsO katalógus előállítása

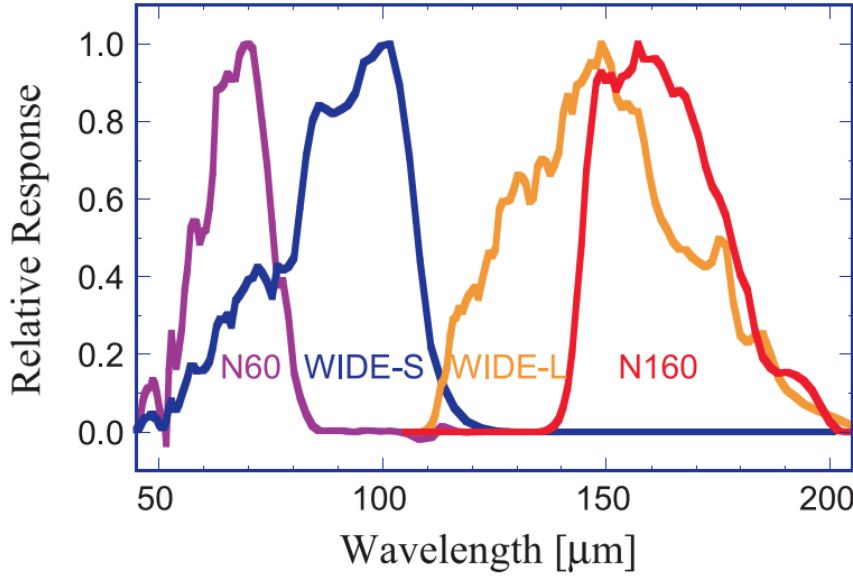
Elsőként olyan mintáját állítottam elő a fiatal csillagszerű objektumoknak (továbbiakban FCsO), amely az AKARI műhold (Murakami és mtsai, 2007) távoli-infravörös méréseiből származó pontforrás katalóguson (FIS BSC, Yamamura és mtsai, 2010) alapul. A FCsO-ok a csillagközi felhőmag összehúzódása után, a protosztelláris fázis, valamint a FCsO körüli porburok elvesztése, a korongképződés legkorábbi stádiumaiban a távoli-infravörös hullámhosszakon is fényesek. Az AKARI FIS műszer ennek a fejlődési fázisnak a megfigyelésében nyújt segítséget azzal, hogy 65 és 160  $\mu m$  között 4 sávban is szolgáltat fotometriai mérési eredményeket. Ebben a fejezetben válogatási módszereket teszteltem, amelyek közül a további fejezetekben bemutatott vizsgálatokhoz a legjobb eredményt adó válogatást használtam.

### 3.1. Az AKARI műhold és a távoli-infravörös pontforrás katalógus

Az AKARI az első japán műhold, amelyet kifejezetten az infravörös sugárzás detektálására és mérésére terveztek. 68,5 cm átmérőjű tükörrel felszerelt, hűtött teleszkóp, amelyen két, a fókusz síkban található műszer kapott helyet. Ezek a műszerek fotometriai és spektroszkópiai méréseket végeztek a 2-180  $\mu m$ -es hullámhossztartományban, lefedve a közeli-, közép- és távoli-infravörös sugárzási tartományt. Jelen pillanatban ez az egyetlen olyan méréssorozat, amely publikus, és a 100  $\mu m$ -es tartományon túl a teljes égről adatokat szolgáltat.

A műszerek egyike a FIS (Far-Infrared Surveyor, Kawada és mtsai, 2007), amely névlegesen a 65, 90, 140 és 160  $\mu m$ -es hullámhosszakon végzett fotometriai méréseket. A 65 és 160  $\mu m$ -es hullámhosszakhoz egy-egy keskeny sávú szűrőt, a 90 és 140  $\mu m$ -en pedig egy-egy széles sávú szűrőt telepítettek. Részletesebben ld. 3.1. ábra és 3.1. táblázat.

Az AKARI FIS BSC összesen 427071 db forrás adatait tartalmazza. Ezen adatok



3.1. ábra. Az AKARI FIS műszer 4 sávbán mért relatív érzékenysége a hullámhossz függvényében. (Kawada és mtsai, 2007)

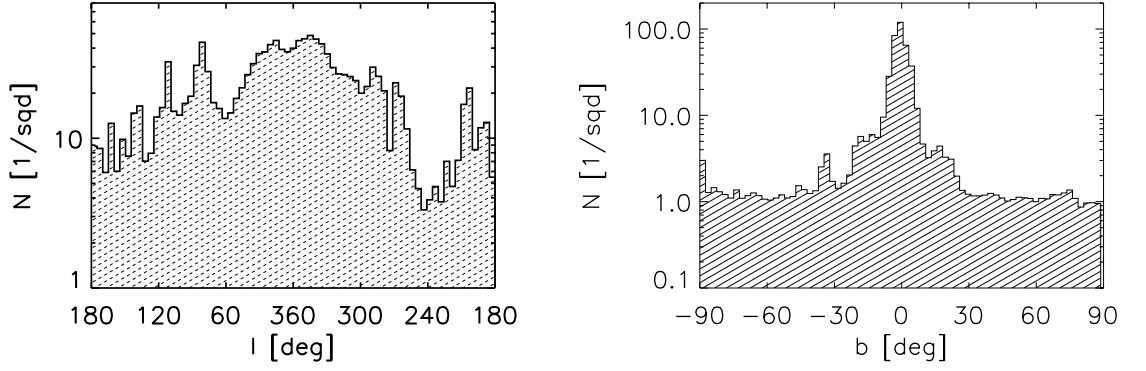
3.1. táblázat. Az AKARI FIS mérési sávjai és azok sávszélessége.

SÁV	N60	W90	W140	N160	
Sávközép	65	90	140	160	$[\mu m]$
Effektív sávszélesség	21,7	37,9	52,4	34,1	$[\mu m]$
PSF - mért FWHM	$37 \pm 1$	$39 \pm 1$	$58 \pm 3$	$61 \pm 4$	$['']$

közül a további vizsgálatok szempontjából legfontosabbak a következők: rektaszcenzió [fok], deklináció [fok], a négy sávbán (65, 90, 140 és 160  $\mu m$ -en) mért fluxussűrűség értékek [Jy] és a hozzájuk tartozó, a mért érték jóságát mutató "quality flag"-ek. A katalógus forrásainak galaktikus koordináták szerinti felületi sűrűség eloszlását a 3.2. ábra mutatja.

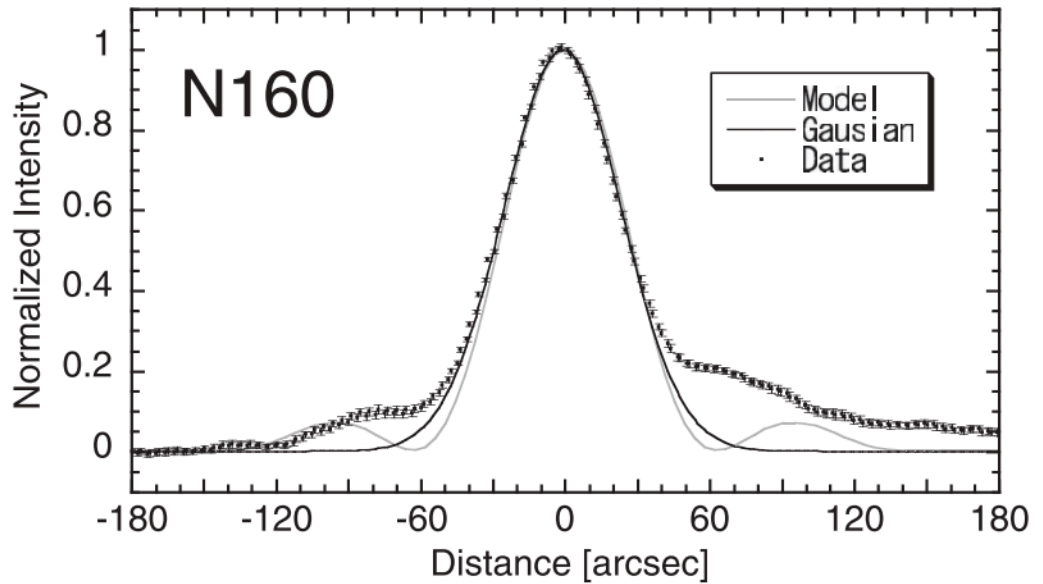
## 3.2. Kétszín diagramok

Elterjedt módszer különböző csillagászati objektumok szétválogatásánál és osztályozásánál a kétszín diagramok használata, ahol a fotometriai mérésekből származó fényességértékek különbségéből képzünk színeket. T Tau típusú objektumokat, hideg felhőmagokat, csillag- vagy galaxisszerű objektumokat már az IRAS műhold [12/25], [25/60] és [60/100] színei alapján is azonosítottak (Emerson, 1987, Myers és mtsai, 1987). Ezen kívül klasszikus T Tau forrásokat helyét azonosították a 2MASS J-H, H-K<sub>s</sub> szín-szín diagramon (Cutri és mtsai, 2003). Gutermuth és mtsai (2008) a Spitzer űrtávcső közeli-



3.2. ábra. Az AKARI FIS BSC források galaktikus hosszúság (bal oldal) és galaktikus szélesség (jobb oldal) szerinti eloszlása. A hosszúság szerinti eloszlásban jelentős lokális minimumok és maximumok figyelhetők meg. A szélesség szerinti eloszlásban egyértelmű maximum látható a galaktikus fősík irányában.

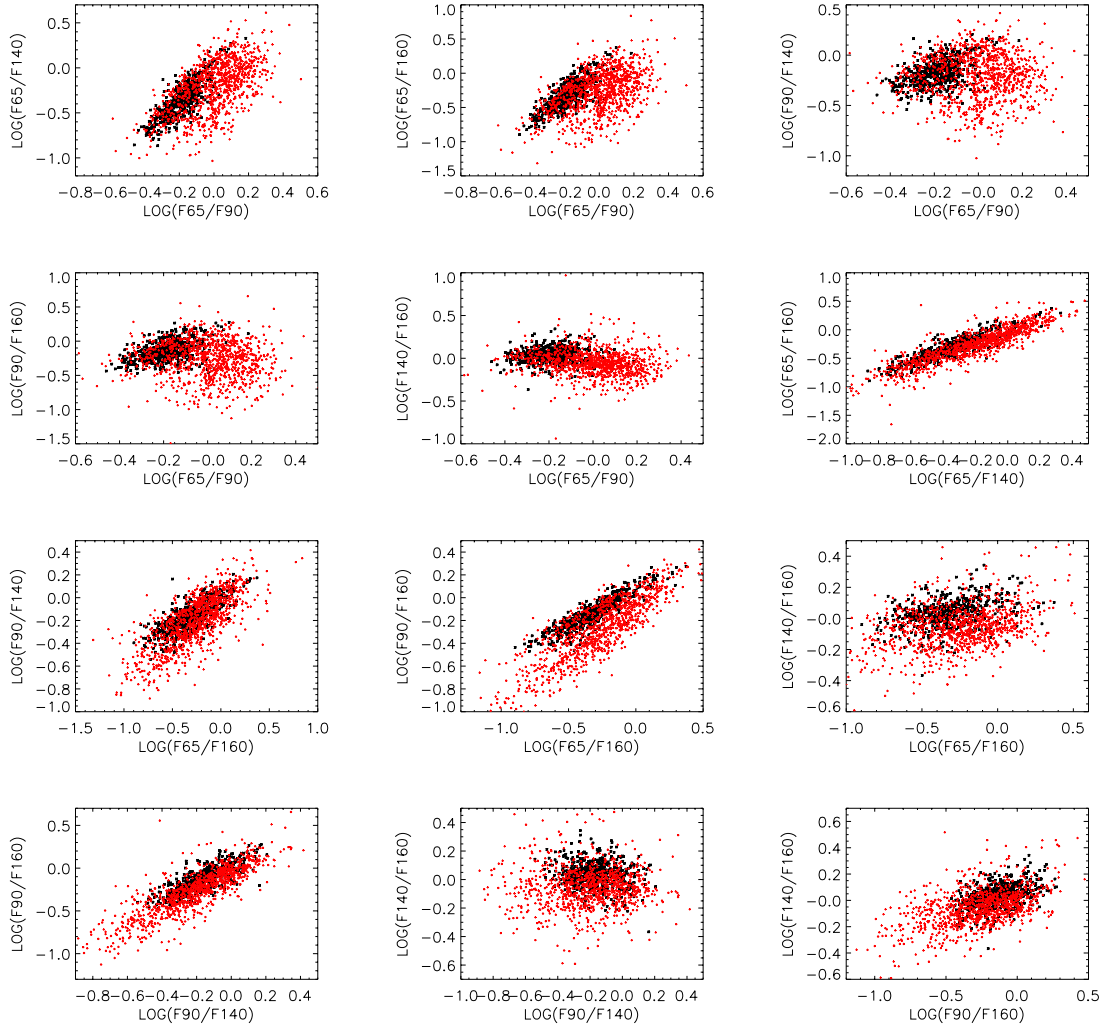
és közép-infravörös mérést felhasználva, [4,5/5,8], [5,8/8,0], [3,6/5,8], [4,5/8,0] színek alapján klasszifikált FCsO-okat, illetve további módszereket részletez a közeli- és közép-infravörös adatok alapján történő klasszifikációról Rebull és mtsai (2010) és Koenig és mtsai (2012).



3.3. ábra. Az AKARI N160 sáv PSF-je. (Kawada és mtsai, 2007)

Az AKARI műhold esetében a 65, 90, 140 és 160  $\mu m$ -en mért fluxussűrűségek adták a kiinduló adatokat. A FCsO-ok és az extragalaxisok színei azonban nagyon nagy ha-

sonlóságot mutatnak. Ahhoz, hogy a lehető legjobb válogatást érhessük el, az adatokat körültekintően kell kezelni. Az említett fluxussűrűségekhez elérhető az adott fotometriai mérések jóságát jellemző ún. "quality flag". Mivel a 90 és 140  $\mu m$ -es szűrő nagy átfedést mutat a 65 és 160  $\mu m$ -es szűrőkkel (ld. 3.1. ábra), ezért azt követeltem meg, hogy a 90-es és 140-es fluxusminőség a legjobb, azaz hármas legyen, míg a két keskeny sávú szűrővel mért fluxussűrűségnél csak az volt az elvárás, hogy legyen mért érték. Ezek a kritériumok 69236 objektum vizsgálatát engedik meg.



3.4. ábra. Az AKARI fluxusok felhasználásával készített kétszín diagramok. A fekete szimbólumok a SIMBAD alapján azonosított extragalaktikus forrásokat jelölik, a piros szimbólumok a SIMBAD alapján ismert FCSO-okat. A két típus minden szín-szín kombinációban jelentős átfedést mutat.

Ahhoz, hogy ki tudjunk választani adott típusú objektumokat, tudnunk kell, hogy azok hol helyezkednek el a kétszín diagramokon. Ezért első lépésben a SIMBAD<sup>1</sup> kata-

<sup>1</sup><http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

lógus segítségével az összes objektumot megpróbáltam beazonosítani. Asszociált objektumokat kerestem a források 30 ívmásodperces környezetében. Ez az érték kb. megfelel az AKARI N160-as PSF (point spread function) félértékszélességének (ld. 3.3. ábra és 3.1. táblázat). 21736 esetben találtam a keresősugáron belül egy, vagy több asszociált objektumot. A maradék 404406 esetben a SIMBAD katalógus nem adott vissza találatot. A továbbiakban galaxisnak vettem azt az AKARI objektumot, amelyhez a legközelebbi, 30 ívmásodpercen belül található objektum a SIMBAD "G"<sup>2</sup>, azaz galaxis főtípusának bármelyik altípusába tartozik, valamint a "b" galaktikus szélességének abszolút értéke nagyobb volt, mint 3°. 4609 db ilyen forrás adódott. Fiatal csillagnak vettem azokat a forrásokat, amelyeknél a legközelebbi asszociált objektum típusa "Y\*O", "Y\*?", "TT\*", "TT?", "Or\*", "HH", "pr\*", "pr?", "FU\*", "Em\*", "\*iC", vagy "WR\*" volt, valamint azokat, amelyeknek a 30 ívmásodperces környezetében volt "HII" típusú objektum. Ezek alapján 2021 ilyen objektumot találtam. A második lépésben a már említett távoli-infravörös fluxussűrűségekből minden kombinációban színeket képeztem, és kétszín diagramokat készítettem, ld. 3.4. ábra. Ahogy látható, a fekete színnel jelölt galaxisok és a piros színnel jelölt FCsO-ok között szinte teljes az átfedés, így a kétszín diagramok alapján nem lehetséges a megkülönböztetésük, ld. 3.2. táblázat.

### 3.3. Szín-fényesség diagramok

Miután a kétszín diagramok alapján úgy találtam, hogy nem lehetséges a FCsO-ok és a galaxisok csoportjának szétválogatása, következő lépésben a fényességeket ábrázoltam a színek függvényében. Ahogy a 3.5. ábrán látható, a fényesség alapján már jelentős különbség adódik a galaxisok és a FCsO-ok között, amely legjobban a 140 és 160  $\mu m$ -es fényességben mutatkozik meg (ld. 3.2. táblázat). Ahhoz, hogy jellemezni tudjam mennyire válik szét a két csoport, a szín és a fényesség szerinti eloszlásra is egy egyenest illesztettem, amihez az IDL program astro csomagjában (Landsman, 1993) található "ladfit" (Least Absolute Deviation) elnevezésű rutint használtam. Az illesztett egyenest kiterjesztettem az adott irányban vett szórásokkal, negatív és pozitív irányban is. Így két, egy pontban egymást metsző egyenes helyett két-két egyenes metszéséből kirajzolódó paralelogramma segítségével próbáltam a szín-fényesség diagramokon beazonosítani, hogy főként hol helyezkedik el a galaxisok, illetve FCsO-ok csoportja, ld. 3.5. ábra.

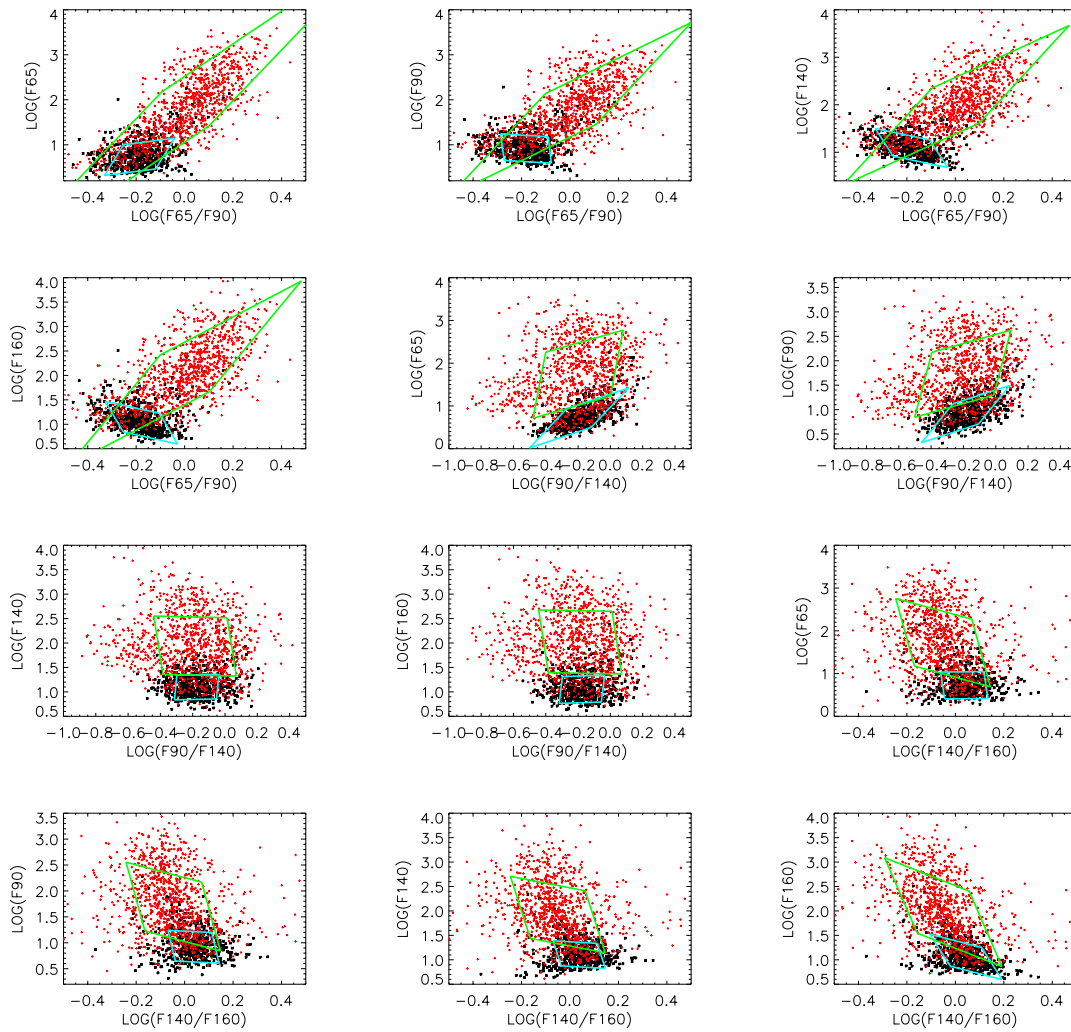
Ezután megnéztem, hogy az egyes diagramokon rajzolt paralelogrammákban hány db galaxis, valamint FCsO található, illetve kiszámítottam ezek arányát az összes klasszifikációhoz használt és ábrázolt galaxis, valamint FCsO számából, ld. 3.3. táblázat. Az oszlopok jelentése a következő: 1) a szín és a fényesség, 2) a galaxisok száma és aránya a galaxisokra számított paralelogrammában, 3) a FCsO-ok száma és aránya a

---

<sup>2</sup>A típusokról bővebben ld.: <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-display?data=otypes>

galaxisokra számított paralelogrammában, 4) a galaxisok száma és aránya a FCsO-okra számított paralelogrammában, 5) a FCsO-ok száma és aránya a FCsO-okra számított paralelogrammában.

Ahogy látható, a galaxisokat a legnagyobb arányban (89,7%) a  $\text{LOG}(\text{F140}/\text{F160})$  -  $\text{LOG}(\text{F160})$  diagramon tudtam megtalálni, de a galaxisok paralelogrammájába esett a FCsO-ok 23,9%-a is. A FCsO-okat a legnagyobb arányban a  $\text{LOG}(\text{F65}/\text{F90})$  -  $\text{LOG}(\text{F65})$  diagramon tudtam megtalálni (83,6%), azonban a FCsO-ok paralelogrammájába esett a galaxisok 60,1%-a is. Látható tehát, hogy a klasszifikáció a szín-fényesség diagramokon is csak jelentős nagyságú szennyezettséggel lehetséges, mivel a két csoport közötti átfedés minden esetben jelentős.



3.5. ábra. Szín-fényesség diagramok az illesztett egyenesek és megfelelő szórások alapján számított paralelogrammákkal, a jelölés megegyezik a 3.4. ábrán használttal. A két típus jobban szétválik, mint a szín-szín diagramok esetében, de még mindig jelentős átfedés figyelhető meg.

3.2. táblázat. *A galaxisok és FCsO-ok átlagos színe és fényessége a megfelelő szórásokkal.*

	G	FCsO
LOG(F65/F90)	-0,184±0,097	-0,006±0,164
LOG(F65/F140)	-0,354±0,196	-0,213±0,280
LOG(F65/F160)	-0,320±0,210	-0,269±0,303
LOG(F90/F140)	-0,170±0,130	-0,207±0,226
LOG(F90/F160)	-0,136±0,146	-0,263±0,267
LOG(F140/F160)	0,034±0,089	-0,056±0,145
LOG(F65)	0,782±0,315	1,765±0,731
LOG(F90)	0,967±0,293	1,771±0,616
LOG(F140)	1,137±0,252	1,978±0,595
LOG(F160)	1,103±0,274	2,034±0,640

3.3. táblázat. *A galaxisok és FCsO-ok száma és aránya az illesztések alapján rajzolt paralelogrammákon belül.*

szín-fényesség	G -> G		FCsO -> G		G -> FCsO		FCsO -> FCsO	
	db	%	db	%	db	%	db	%
LOG(F65/F90) - LOG(F65)	3391	73,6	372	18,4	2768	60,1	1689	83,6
LOG(F65/F90) - LOG(F90)	2765	60,0	246	12,1	1987	43,1	1481	73,3
LOG(F65/F90) - LOG(F140)	2900	62,9	191	9,45	1478	32,1	1407	69,6
LOG(F65/F90) - LOG(F160)	3001	65,1	320	15,8	1457	31,6	1391	68,8
LOG(F90/F140) - LOG(F65)	3706	80,4	456	22,6	1909	41,4	1092	54,0
LOG(F90/F140) - LOG(F90)	3866	83,9	357	17,7	1132	24,6	1140	56,4
LOG(F90/F140) - LOG(F140)	2645	57,4	165	8,2	703	15,3	864	42,8
LOG(F90/F140) - LOG(F160)	2594	56,3	238	11,8	801	17,4	886	43,8
LOG(F140/F160) - LOG(F65)	2924	63,4	431	21,3	1898	41,2	1132	56,0
LOG(F140/F160) - LOG(F90)	2842	61,7	337	16,7	1515	32,9	1137	56,3
LOG(F140/F160) - LOG(F140)	2984	64,7	245	12,1	1141	24,8	1149	56,9
LOG(F140/F160) - LOG(F160)	4134	89,7	484	23,9	1866	40,5	1327	65,7

### 3.4. Klasszifikáció lineáris diszkriminancia-analízis segítségével

Több dimenziós adatsorok esetében azonban lehetőség van más statisztikai módszerek alkalmazására is. Ezek közül a különböző esetek kategorizálására és a kategóriába tartozás előrejelzésére gyakran alkalmazott módszer a diszkriminancia-analízis. A lineáris diszkriminancia-analízis (LDA, Everitt és mtsai, 2001) során egy olyan diszkriminancia-függvényt hozunk létre, amely a független változók lineáris kombinációjaként a függő változókat a legjobban kategorizálja. A diszkriminanciafüggvény a következőképp írható

le:

$$Z = a + w_1X_1 + w_2X_2 + \dots + w_pX_p, \quad (3.1)$$

ahol "a" egy konstans tag, "w" a diszkriminancia-együttható, X pedig a független változó. A diszkriminancia-analízist ma már számos matematikai és statisztikai szoftver képes a bemenő adatok alapján elvégezni, én az R<sup>3</sup> elnevezésű statisztikai programcsomagot használtam.

Ahhoz, hogy a diszkriminancia-analízist elvégezhessük, először egy tanítási fázis szükséges, aminek során a különböző csoportokhoz hozzárendeljük azokat az adatokat, amelyek alapján a későbbiekben klasszifikálni szeretnénk. Mivel egymástól lineárisan független adatokra van szükség, ezért az AKARI adatok esetében a LOG(F65/F90), LOG(F90/F140), LOG(F140/F160) színeket vettem alapul, valamint a LOG(F140) fényességet. Ahogy a 3.2. táblázatból látható, a legnagyobb elkülönülést, ezáltal a legjobb klasszifikációt a hosszabb hullámhosszú fényességek felhasználásával várhatjuk. Mivel a 160  $\mu m$ -en nem követeltem meg, hogy a fluxusminőség a legjobb legyen, ezért használtam a 140  $\mu m$ -es fényességet.

A tanítóminta esetében megköveteltem az ismert típusú objektumoktól, hogy minden hullámhosszon a legjobb minőségű legyen a fluxusuk. Így 1022 db FCsO és 520 db galaxis segítségével a felsorolt adatok alapján a kiinduló kritériumoknak megfelelő 69236 AKARI forrásból 21590 db forrást találtam, amely 0,5-nél nagyobb valószínűséggel (a továbbiakban  $\eta$ ) tartozik a FCsO-ok csoportjába, valamint 47646 db forrást, ami  $\eta > 0,5$  valószínűséggel tartozik a galaxisok csoportjába. A FCsO csoporthoz tartozás valószínűségének eloszlását ld. 3.6. ábra.

Ahhoz, hogy a válogatás jóságát megbecsüljem, leellenőriztem, hogy az előzetesen definiált csoportokból hány objektum esik a klasszifikáció alapján ugyanabba, vagy épp a másik csoportba. A 1022 db előzőleg FCsO-nak mondott objektum közül 835 db-ot klasszifikáltam újra, mint FCsO objektum, azonban 187 db  $\eta > 0,5$  valószínűséggel galaxisnak adódott. Az 520 db előzetesen galaxisnak mondott forrásból 469 db ismételt galaxisnak adódott, míg mindösszesen 51 db adódott FCsO-nak  $\eta > 0,5$  valószínűséggel. Tehát a bemenő adatok alapján a rosszul klasszifikált FCsO-ok aránya 18,3%, míg a galaxisok között ez az arány 9,8%. Ezen kívül megvizsgáltam, hogy a szétválasztás után két csoportba sorolt források milyen típusú SIMBAD objektumoknak felelnek meg a már korábban elvégzett 30 ívmásodperces pozíció-korreláció alapján. Az eredményeket a 3.4. táblázat tartalmazza, ahol az oszlopok jelentése a következő: 1) a csoport neve, amelybe a LDA során a forrást klasszifikáltam, 2) az adott csoportba klasszifikált AKARI források száma, 3) a legközelebbi, illetve a keresősugáron belülre eső összes adott SIMBAD típusú forrást mutató sorok azonosítója, 4) az összes legközelebbi, illetve keresősugáron belülre

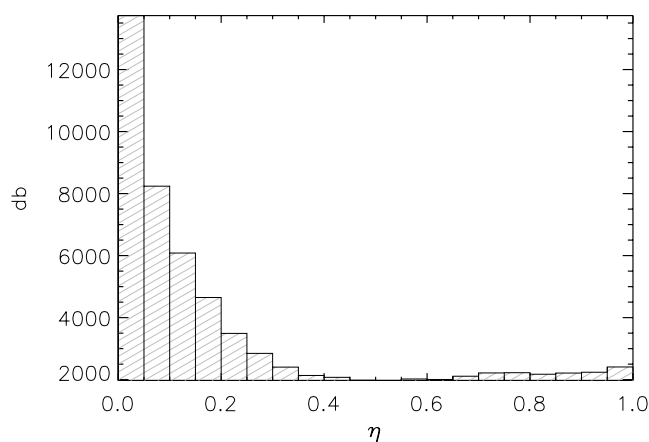
---

<sup>3</sup><http://www.r-project.org/>



eső forrás száma, 5) a már korábban definiált FCsO altípushoz tartozó források száma, 6) a SIMBAD "IR" típushoz tartozó források száma, 7) a SIMBAD "mm", vagy "smm" típushoz tartozó források száma, 8) a SIMBAD "ISM", azaz csillagközi anyag típusba tartozó források száma, 9) a SIMBAD "\*" típusba tartozó források száma, 10) a SIMBAD "G" típusba tartozó források száma.

A táblázat alapján látható, hogy a klasszifikálni kívánt mintában a SIMBAD galaxisok száma, ha a legközelebbi asszociált objektumot vesszük figyelembe, akkor 4970 db. (Tehát ennyi forrás van, aminek a 30 ívmásodperces környezetében egy "G" típusú SIMBAD objektum a legközelebbi forrás.) Ebből mindösszesen 133 db, azaz 2,7% található a FCsO-oként klasszifikált mintában. A SIMBAD FCsO-ok száma 1059 db. Ebből 430 db, vagyis 40,6% azonban a galaxisként klasszifikált mintában található. Tehát a galaxisok kiválasztásában a módszer nagyon jó eredményt adott, azonban a FCsO-ok majdnem felét rosszul klasszifikálta. Ahogy a 3.6. ábrán is látható, a FcsO csoporthoz tartozás valószínűségének eloszlása erős maximumot mutat 0 és 0,1 között, vagyis az ilyen valószínűséggel rendelkező objektumok nagyon nagy valószínűséggel tartoznak a másik, galaxis csoportba. Ez egybevág azzal, hogy a galaxisok klasszifikációja igen kis hibát mutat.



3.6. ábra. A FCsO csoporthoz tartozás valószínűségi eloszlása LDA alapján, AKARI adatok felhasználásával. A források 69%-a  $\eta > 0,5$  valószínűséggel galaxis.

### 3.5. Azonosítás kvadratikus diszkriminancia-analízis segítségével

Mivel a FCsO-ok klasszifikációja a LDA segítségével csak igen nagy hibával volt lehetséges, ezért egy másik diszkriminancia-analízis, a kvadratikus diszkriminancia-analízis (QDA, McLachlan 1992) segítségével is elvégeztem a klasszifikációt a korábbi adatok segítségével. Fontos különbség a LDA-hez képest a QDA-ben, hogy a QDA nem feltételezi,

3.4. táblázat. AKARI adatok alapján LDA segítségével kapott válogatás SIMBAD asszociáltjai.

	db		összes	FCsO	IR	mm+smm	ISM	*	G
FCsO	21590	legközelebbi	6806	629	2623	977	705	601	133
		összes	18607	1627	4091	1869	2933	2265	386
galaxis	47646	legközelebbi	12654	430	3915	133	534	1242	4837
		összes	26755	889	4863	219	3704	3666	6550
összes	69236	legközelebbi	19460	1059	6538	1110	1239	1843	4970
		összes	45362	2516	8954	2088	6637	5931	6936

hogy a különböző csoportok variancia mátrixa megegyező, hanem minden osztályra külön becslést végez. Végeredményben a különböző osztályokat nem egy lineáris, hanem egy kvadratikus alakú határral választja szét. Emiatt a QDA nagyobb rugalmasságot biztosít az adatok sorok, csoportok szétválasztásában. Alapja a Bayes-tétel, amely feltételes valószínűségek és fordítottjaik között állít fel kapcsolatot. A Bayes-tétel felírható a következő alakban (Venables, W. N. & Ripley, B. D., 2002):

$$p(c|\mathbf{x}) = \frac{\pi_c p(\mathbf{x}|c)}{p(\mathbf{x})} \propto \pi_c p(\mathbf{x}|c), \quad (3.2)$$

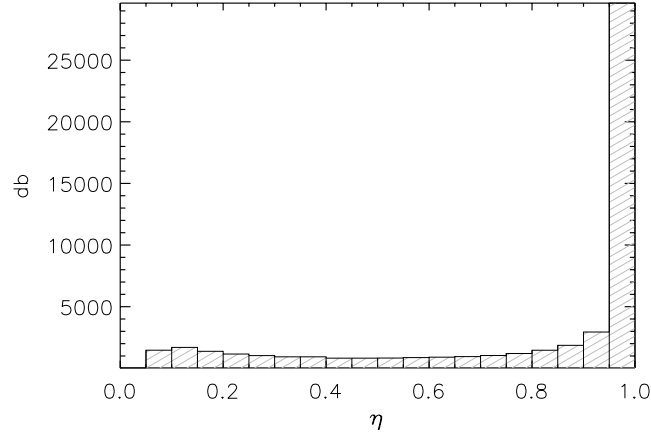
ahol  $\pi_c$  az egyes osztályok "prior probability"-je,  $p(\mathbf{x}|c)$  pedig az egyes osztályokban megfigyelt eloszlások sűrűsége. Ha a  $c$  osztály eloszlása többdimenziós normális eloszlás  $\mu_c$  átlagértékkel és  $\Sigma_c$  kovarianciával, akkor a Bayes-tétel a következőképpen minimalizál:

$$Q_c = -2\log p(\mathbf{x}|c) - 2\log \pi_c = (\mathbf{x} - \mu_c)\Sigma_c^{-1}(\mathbf{x} - \mu_c)^T + \log|\Sigma_c| - 2\log \pi_c \quad (3.3)$$

A fenti kifejezésben az első tag az ún. négyzetes Mahalanobis távolság (Mahalanobis, 1936). Két osztály esetében a  $Q - c$ -k közötti különbség az  $\mathbf{x}$ -nek valamilyen kvadratikus függvényei, az egyes osztályok között határok pedig kvadratikus felületek az  $\mathbf{x}$  térben.

A QDA analízis alapján a 69236 db AKARI forrás közül 58969 forrás adódott  $\eta > 0,5$  valószínűséggel FCsO-nak, míg 10267 db adódott  $\eta > 0,5$  valószínűséggel galaxisnak. A válogatás jóságát a korábbival azonos módon ellenőriztem. Az 1022 db FCsO-ból 838 db adódott ismételt FCsO-nak (82%), míg 184 db (18%) került a galaxis csoportba. Az 520 db galaxisból 470 db (90,4%) esett újra a galaxis csoportba, míg 50 db (9,6%) a fiatal csillagok csoportjába esett. Ez a LDA eredményével összehasonlítva azt jelenti, hogy ha minimálisan is, de jobb eredményt kaptam amellett, hogy a FCsO-ok száma jelentősen megnőtt.

A 3.5 táblázatban is látható, hogy a FCsO-ok klasszifikációja a korábbihoz képest jelentősen jobb. A korábbi 40,6%-kal szemben mindössze 22,2%-a esett a galaxisok csoportjába. Azonban a korábbival szemben nagyon megnőtt a minta galaxisokkal való



3.7. ábra. A FCsO csoporthoz tartozás valószínűségi eloszlása QDA alapján, AKARI adatok felhasználásával. A források 85%-a  $\eta > 0,5$  valószínűséggel FCsO.

3.5. táblázat. Az AKARI adatok alapján QDA segítségével kapott válogatás SIMBAD asszociáltjai.

	db		összes	FCsO	IR	mm+smm	ISM	*	G
FCsO	58969	legközelebbi	13863	824	4803	1058	996	1562	2554
		összes	28864	1918	6633	1926	3810	3678	3387
galaxis	10267	legközelebbi	10186	235	1725	52	243	281	2416
		összes	21811	598	2321	112	2827	2253	3549
összes	69236	legközelebbi	24049	1059	6528	1110	1239	1843	4970
		összes	50675	2516	8954	2038	6637	5931	6936

szennyezettsége. A korábbi 2,7% helyett a rosszul klasszifikált galaxisok aránya most 51,4%, ami semmiképpen sem elfogadható eredmény.

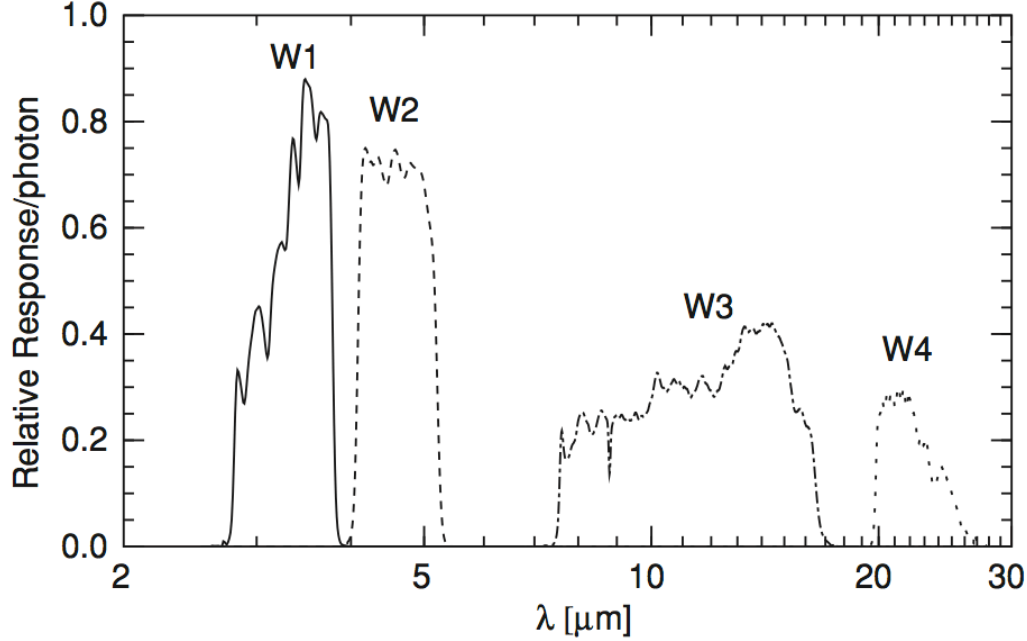
### 3.6. A FCsO minta előállítása AKARI+WISE adatok segítségével

Az előző fejezetekben bemutattam, hogy tisztán AKARI adatok felhasználásával nem lehetséges a galaxisok és a FCsO-ok külön-külön elfogadható szennyezettségű csoportokba sorolása. A WISE (Wide-field Infrared Surveyor Explorer, Wright és mtsai, 2010) űrtávcső közeli- és közép-infravörös tartományban végzett teljes-égbolt méréseket. A mérések alapján készült, 2012. március 14-e óta publikus pontforrás katalógus (Cutri és mtsai, 2012) közel 564 millió forrásról szolgáltat adatokat 3,4, 4,6, 12,1 és 22,2  $\mu\text{m}$ -es effektív hullámhosszakon (a továbbiakban W1, W2, W3 és W4).

Az AKARI pontforrások WISE megfelelőit a NASA/IPAC Infrared Science Archive<sup>4</sup>

<sup>4</sup><http://irsa.ipac.caltech.edu/>

segítségével kerestem, 5 ívmásodperces keresősugár használatával. Azért, hogy a lehető legtöbb AKARI forrást tudjam a későbbi klasszifikáció során használni, csak azok között a WISE pontok között kerestem, amelyek esetében a W1 és W2 magnitúdó hibája 0,2-nél kisebb volt. Ahogy a 3.8. ábrán is látható, a detektor érzékenysége ebben a két sávban a legnagyobb. A későbbiekben az AKARI forráshoz legközelebb eső ilyen WISE pont adatait használtam. Így végül 64653 db objektum klasszifikációját tudtam elvégezni.

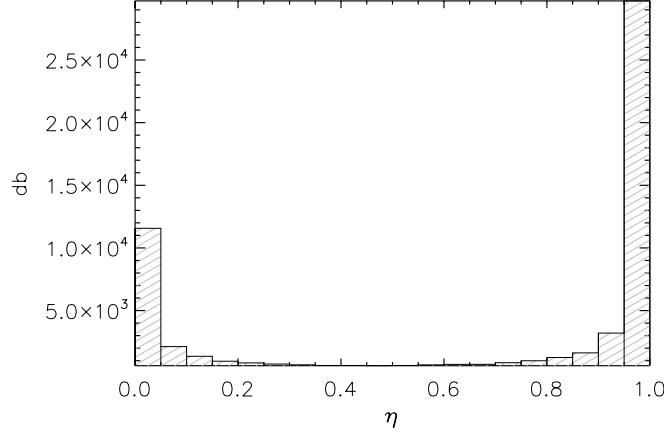


3.8. ábra. A WISE relatív válaszfüggvényei a W1, W2, W3 és W4 sávokban a hullámhossz függvényében. (Wright és mtsai, 2010)

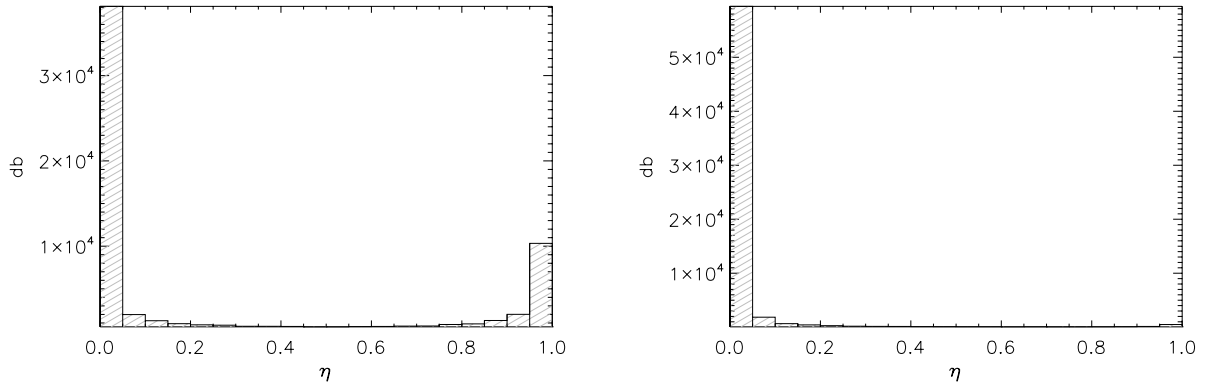
A tanítási fázis ebben az esetben különbözött a korábbiaktól. Nem csak azokat a forrásokat vettem figyelembe, amelyeknek mind a 4 AKARI fluxussűrűsége a legjobb minőségű volt, hanem azokat is, amelyeknél csak a 90 és 140  $\mu m$ -es adatok voltak jó minőségűek. Ezen kívül a galaxisok és FCsO-ok mellett egy harmadik csoportot is definiáltam a QDA tanítási fázisában. Ez a harmadik csoport az elfejlődött, vörös csillagok csoportja. Ilyen típusú objektumnak tekintettem azokat a forrásokat, amelyeknek a SIMBAD típusa "RG\*", "AB\*", "C\*", "S\*", "sg\*", vagy "pA\*". Ilyen forrásból mindössze 13 db volt megtalálható a listában.

A klasszifikáció alapját tehát az AKARI LOG(F65/F90), LOG(F90/F140), LOG(F140/F160) színek, a LOG(F140) fluxussűrűség, valamint a WISE W1-W2 szín és W1 fényesség adták. Az elfejlődött vörös csillagok csoportjának bevonása miatt, a korábbiakkal ellentétben egy adott forráshoz nem csak kettő valószínűség adódott, hanem három - annak a valószínűsége, hogy a forrás a galaxis csoporthoz tartozik, annak a valószínűsége, hogy a forrás a FCsO csoporthoz tartozik és annak a valószínűsége, hogy a forrás az elfejlődött csillagok csoportjába tartozik. A korábbiakhoz hasonlóan szintén

azokat az objektumokat tekintetem csoporttagnak, amelyek az adott csoporthoz  $\eta > 0,5$  valószínűséggel tartoztak. A harmadik csoport jelenléte miatt azonban 268 forrást nem sikerült egyik csoporthoz sem rendelni. A FCsO csoporthoz tartozás valószínűségi eloszlását a 3.9. ábra, a galaxis csoporthoz tartozás valószínűségi eloszlását 3.9. ábra, a vörös, elfejlődött csillagok csoportjához tartozás valószínűségi eloszlását pedig a 3.9. ábra mutatja.



3.9. ábra. A FCsO csoporthoz tartozás valószínűségi eloszlása QDA alapján, AKARI+WISE adatok felhasználásával. A források 69%-a  $\eta > 0,5$  valószínűséggel FCsO.



3.10. ábra. A galaxisok és az elfejlődött csillagok csoportjához tartozás valószínűségi eloszlása QDA alapján, AKARI+WISE adatok felhasználásával. A források 29%-a  $\eta > 0,5$  valószínűséggel galaxis, 2%-a  $\eta > 0,5$  valószínűséggel elfejlődött csillag.

A QDA eredményeként a FCsO-ok csoportjába 44588 forrás, a galaxisok csoportjába 18494 forrás, a vörös csillagok csoportjába pedig 1303 db forrás esett  $\eta > 0,5$  valószínűséggel. Ismételten elvégeztem a klasszifikáció jóságát mutató ellenőrzést. A korábban használt 1022 db, FCsO-oként azonosított forrásból ismételten FCsO-nak klasszifikáltam 994 db objektumot, ami 97,3%-ot jelent. A maradék 28 db-ot jelentő 2,7% teljes egészében a galaxis csoportba esett. A jelenlegi klasszifikációnál használt 2021 db FCsO objektumból 1826 db-ot (90,4%) kaptam vissza a FCsO-ok csoportjába, 182 db-ot (9%) találtam galaxisnak és 13 db (0,6%) esett az elfejlődött, vörös csillagok csoportjába.

3.6. táblázat. Az AKARI+WISE adatok felhasználásával, QDA alapján kapott válogatás SIMBAD asszociáltjainak darabszáma.

	db		összes	FCsO	IR	mm+smm	ISM	*	G	EVO
FCsO	44588	legközelebbi összes	11235 28759	965 2295	5254 7117	1008 1905	1027 4480	724 4175	387 810	55 93
galaxis	18494	legközelebbi összes	6602 14045	63 131	1062 1502	7 20	114 1888	212 662	4564 6098	5 13
vörös csillag	1303	legközelebbi összes	271 350	6 17	124 128	1 1	5 14	30 39	6 7	11 12
nem klasz- szifikált	268	legközelebbi összes	23 40	0 1	14 14	0 0	0 0	6 19	1 2	0 0
összes	64653	legközelebbi összes	18131 43194	1034 2444	6454 8761	1016 1926	1146 6382	972 4895	4958 6917	71 118

3.7. táblázat. Az AKARI+WISE adatok felhasználásával, QDA alapján kapott válogatás SIMBAD asszociáltjainak százalékos megoszlása. A FCsO-oként klasszifikáltak tartalmazzák a SIMBAD alapján ismert FCsO-ok 93%-át.

	%		összes	FCsO	IR	mm+smm	ISM	*	G	EVO
FCsO	68,97	legközelebbi összes	61,97 66,58	93,33 93,90	81,41 81,24	99,21 98,91	89,62 70,20	74,49 85,29	7,81 11,71	77,46 78,81
galaxis	28,61	legközelebbi összes	36,41 32,52	6,09 5,36	16,45 17,14	0,69 1,04	9,95 29,58	21,81 13,52	92,05 88,16	7,04 11,02
vörös csillag	2,02	legközelebbi összes	1,49 0,81	0,58 0,70	1,92 1,46	0,10 0,05	0,44 0,22	3,09 0,80	0,12 0,10	15,49 10,17
nem klasz- szifikált	0,41	legközelebbi összes	0,13 0,09	0,00 0,04	0,22 0,16	0,00 0,00	0,00 0,00	0,62 0,39	0,02 0,03	0,00 0,00
összes	100	legközelebbi összes	100 100	100 100	100 100	100 100	100 100	100 100	100 100	100 100

A korábbi válogatások során használt, galaxisként azonosított 520 forrásból 422 db-ot (81,2%) klasszifikáltam ismét galaxisnak, és 98 db (18,8%) esett a FCsO-ok csoportjába. A klasszifikációhoz jelenleg használt 4609 db galaxisként azonosított objektum közül 4390 (95,2%) esett ismételten a galaxisok csoportjába, 212 (4,6%) a FCsO-ok csoportjába és 7 db esett az elfejlődött csillagok csoportjába (0,2%). A 13 db, korábban elfejlődött, vörös csillagként azonosított forrás közül 6 db-ot klasszifikáltam újra, mint elfejlődött csillag, 3 db esett a galaxisok csoportjába és 4 db a FCsO-ok csoportjába.

Szintén elvégeztem az ellenőrzést a SIMBAD adatbázisban megtalálható asszociált források típusai alapján, ld. 3.6. táblázat. A táblázatot kiegészítettem egy oszloppal, így a 11-dik oszlop az elfejlődött, vörös csillagok számát mutatja. Megvizsgáltam azt is, hogy az adott SIMBAD típusok milyen arányban esnek a QDA alapján klasszifikált csoportokba, ld. 3.7. táblázat.

## 4. fejezet

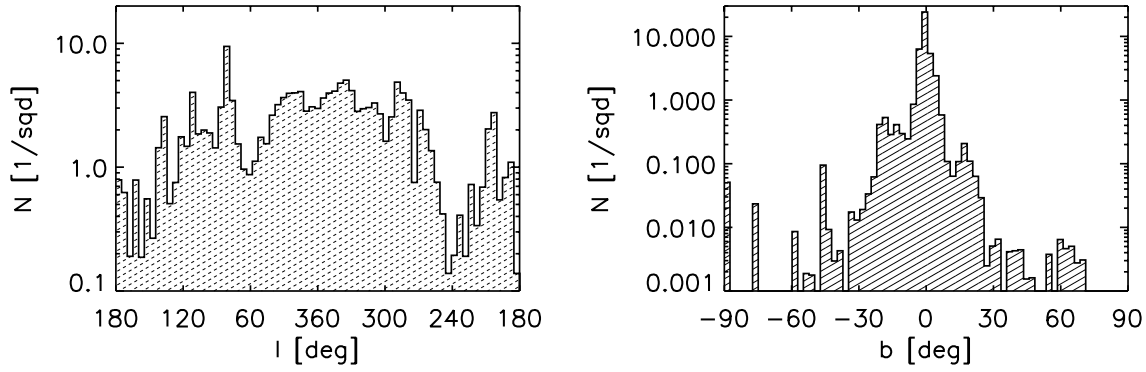
# Az AKARI FCsO jelöltek eloszlásának vizsgálata

Az előző fejezetben bemutattam, hogy hogyan készítettem az AKARI FIS katalógusa alapján, WISE közeli-infravörös adatok felhasználásával a 44588 db FcsO jelöltet tartalmazó mintát. A fejezetben a minta objektumainak eloszlását vizsgálom. Elsőként a galaktikus koordináták szerinti eloszlást mutatom be. Másodikként a Dame és mtsai. (2001) által elvégzett galaktikus CO felmérés alapján azt vizsgálom, hogy a FCsO-ok eloszlása korrelál-e a CO vonal alatti terület nagyságával. Harmadik lépésben a galaktikus infravörös hurkok (GIRL) eloszlásával vetem össze a FCsO-ok eloszlását azt vizsgálva, hogy létezik-e korreláció a sűrű-ritka határfelületekként azonosított hurkok és a FCsO-ok felületi sűrűsége között.

Mielőtt azonban az említett vizsgálatokat elvégeztem volna, a lehető legtisztább mintáját szerettem volna előállítani a QDA alapján kapott FCsO-ok katalógusának. Ezért a SIMBAD katalógus alapján eltávolítottam az összes olyan forrást, amelynek 30 ívmásodperces környezetében megtalálható volt olyan objektum, amelynek vagy a SIMBAD fő típusa, vagy bármelyik SIMBAD altípusa a "G" típusba tartozott. Ezen kívül eltávolítottam a források listájából azokat az objektumokat, amelyek a Nagy Magellán-felhő irányában látszódtak, vagyis galaktikus koordinátáik szerint  $-38^\circ < b < -30^\circ$ , illetve  $275^\circ < l < 283^\circ$  tartományba estek. Ezek után tehát a további vizsgálatokat 40001 db FcsO jelölt felhasználásával tudtam elvégezni.

### 4.1. Felületi sűrűség-eloszlás vizsgálata a galaktikus koordináták szerint

A megtisztított FCsO minta galaktikus hosszúság ( $l$ ) szerinti eloszlásának maximuma  $l = 80^\circ$ -nál található (ld 4.1. ábra, bal oldal). Ebben az irányban található a Cygnus X



4.1. ábra. Az AKARI FCsO jelöltek felületi sűrűség-eloszlása a galaktikus hosszúság (bal) és szélesség (jobb) szerint. Az eloszlásokban lokális maximumok és minimumok figyelhetők meg, valamint a galaktikus szélesség szerinti eloszlásban egyértelmű maximum látható a galaktikus fősík irányában.

(Cyg X) elnevezésű csillagkeletkezési régió. Az eloszlásnak lokális maximuma van még  $l = 100^\circ$ -nál (Cepheus),  $l = 130^\circ$ -nál (Cassiopeia),  $l = 170^\circ - 180^\circ$  környékén (Taurus, Auriga, Perseus),  $l = 210^\circ$ -nál (Orion),  $l = 260^\circ$  környékén (Gum Nebula),  $l = 290^\circ$ -nál (Carina) és  $l = 330^\circ$  környékén (Lupus). Az eloszlás minimuma  $l = 240^\circ$ -nál látható, valamint egy jól látható minimum van  $l = 60^\circ$ -nál. Ezekben az irányokban semmilyen jelentős csillagkeletkezési terület nem található. Mellékminimumok láthatóak még a már említett maximumok közötti területek irányában.

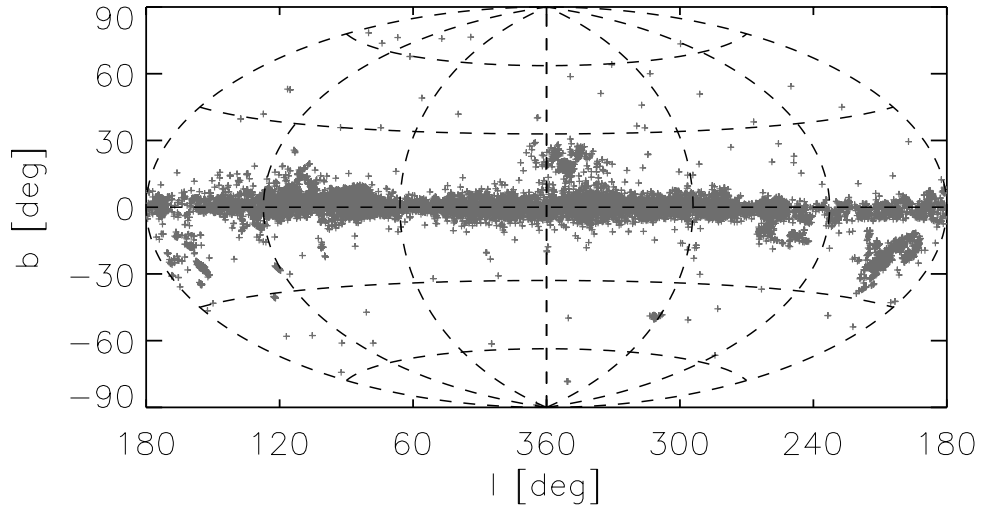
A minta galaktikus szélesség ( $b$ ) szerinti eloszlása nagyon erős maximumot mutat  $b = 0^\circ$ , a galaktikus fősík irányában (ld. 4.1. ábra, jobb oldal). Egy kisebb mellékmaximum látható  $b = -15^\circ$  fok környékén. A Taurus-Auriga-Perseus, valamint az Orion csillagkeletkezési terület is ezen a galaktikus szélességen található. Egy másik mellékmaximum látható  $b = 15^\circ$ -nál is, ahol a Cepheus és a Lupus régió is található. A FCsO-ok eloszlását a galaktikus koordináta-rendszerben a 4.2. ábra mutatja.

## 4.2. A FCsO-ok és a galaktikus $^{12}\text{CO}$ eloszlásának vizsgálata

A galaktikus  $^{12}\text{CO}$ -val való összevetést Dame és mtsai. (2001) mérései alapján végeztem, amely a CfA 1,2 méteres teleszkópjával készült, valamint 31 másik felmérés adatait is felhasználták a készítőik. Tehát a vizsgálataimhoz felhasznált adattömb<sup>1</sup> nem homogén adatokat tartalmaz, a felhasznált beam méret is változik, azonban a teljes sebességintervallumra integrált  $^{12}\text{CO}$  vonal alatti területet ( $W(\text{CO})$ ) megadó adatok minősége

<sup>1</sup><http://www.cfa.harvard.edu/mmw/MilkyWayinMolClouds.html>





4.2. ábra. Az AKARI FCsO jelöltek eloszlása galaktikus  $l, b$  koordináták szerint. A források főként a galaktikus fősík irányában koncentrálnak.

így is elégséges volt. Habár a  $^{12}\text{CO}$  elsősorban a híg csillagközi gáz egyik jelzője, Shetty és mtsai. (2011) radiatív transzfer modellezés segítségével megmutatták, hogy az extinkció, vagy az  $N(\text{H}_2)$  növekedésével együtt jár a teljes sebesség-intervallumra összegzett  $\text{W}(\text{CO})$  növekedés is. Ily módon a  $\text{W}(\text{CO})$ -val történő összevetés alkalmas arra, hogy megmutassam, mely területeken található az oszlopsűrűséghez viszonyítva nagy mennyiségű FCsO.

Ahhoz, hogy összevethessem a FCsO-ok eloszlását a galaktikus  $^{12}\text{CO}$  eloszlásával, első lépésként  $1^\circ \times 1^\circ$ -os cellákra osztottam az égboltot abban a tartományban, ahol volt  $^{12}\text{CO}$  adat, vagyis a  $-35^\circ < b < 35^\circ, 0^\circ < l < 360^\circ$  sávban. Ezután az említett cellákban található FCsO-ok számát elosztottam az adott cella területével, így kapva egy felületi sűrűség [1/négyzetfok] értéket. Ezek után kiszámítottam az adott cellába eső  $^{12}\text{CO}$  térkép pixeleinek átlagos értékét, ezzel az adott területre jellemző átlagos  $\text{W}(\text{CO})$  értéket kapva. Ezek után az adott cellára kapott felületi sűrűséget elosztva a cellára jellemző átlagos  $\text{W}(\text{CO})$  értékkel megkaptam, hogy az adott területen a  $^{12}\text{CO}$  mennyiségéhez képest mennyi a FCsO-ok sűrűsége. Ezt kontúrvonalakkal ábrázolva látható, hogy mely területek rendelkeznek többséggel és mely területek azok, amelyeken kevés FCsO található a  $\text{W}(\text{CO})$ -hoz képest, ld. 4.3. ábra. Ahogy az ábrák is mutatják, az ismert csillagkeletkezési területeken a  $^{12}\text{CO}$  mennyiségéhez képest magas a FCsO-ok aránya. Részletesebben megvizsgálva ezt az arányt, észrevehetőek nagyléptékű ívelt struktúrák. Egy ilyen példát mutat a 4.4. ábra az Orion csillagképből. Látható, hogy a FCsO darabszám/ $\text{W}(\text{CO})$  arány ("a") ábra) egy gyűrűszerű struktúrát alkot. Összehasonlítva az IRAS műhold által mért  $100\ \mu\text{m}$ -es felületi fényesség eloszlásával ("b") ábra) észrevehetjük, hogy a gyűrűszerű alakzatok az infravörösben is megmutatkoznak. Így logikus arra

gondolni, hogy a FCsO-ok eloszlása talán a már korábban bemutatott infravörös hurkok eloszlásával korrelál ("c" ábra).

### 4.3. A FCsO-ok és a galaktikus hurkok eloszlásának vizsgálata

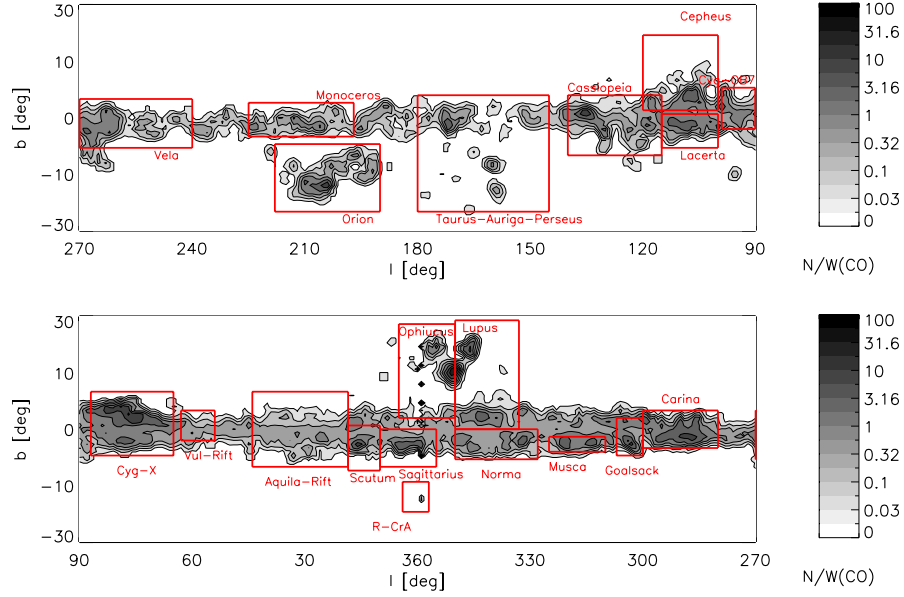
A FCsO-ok és a hurkok eloszlásának összehasonlítását, a korreláció vizsgálatát több lépésben végeztem el. Mivel a galaktikus fősík közelében az anyag, ezáltal az infravörös háttér is nagyon összetett, ezért a hurkok detektálása ebben a régióban nem annyira megbízható, mint magasabb galaktikus szélességeken. A  $|b| > 30^\circ$  felett elhelyezkedő hurkok eredete viszont nagyon különbözik a közepes galaktikus szélességeken található hurkokétól. A magas galaktikus szélességeken jelenlévő turbulens folyamatok kialakíthatnak hurkokhoz hasonló struktúrákat, és a turbulens instabilitások nemlineáris fejlődése is üregeket hozhat létre anélkül, hogy egy csillag energiabetáplálására lenne szükség (Klessen és mtsai. 2000, Korpi és mtsai. 1999, Wada és mtsai. 2000). Ezért a hurkokkal történt összevetésben a  $3^\circ < |b| < 28^\circ, 0^\circ < l < 360^\circ$  sávra szorítkoztam.

A felhőmagok esetében külön figyelmet fordítottam a felületi sűrűség (N) eloszlására és az N/E(B-V) eloszlására is az IN, ON és OFF területeken. Mivel az N/E(B-V) érték teljesebb képet ad arról, hogy a csillagközi por mennyiségéhez mérten hol láthatunk nagyobb számú FCsO-ot, vagyis hogy hol keletkezhetnek a FCsO-ok aktívabban, ezért ebben a fejezetben csak az N/E(B-V) és az infravörös hurkok kapcsolatát vizsgálom, külön a felületi sűrűségét nem.

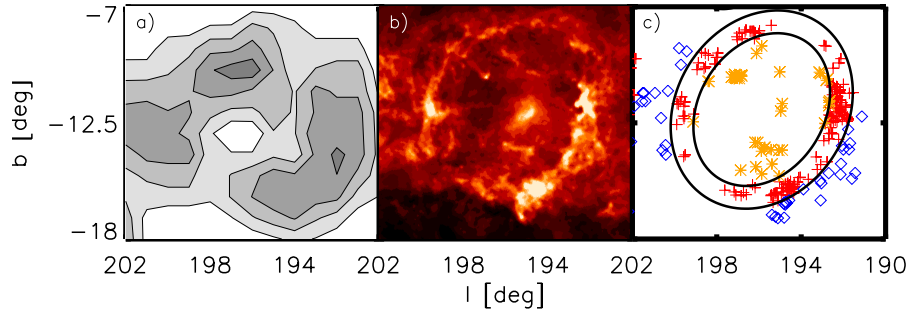
Annak érdekében, hogy statisztikus állításokat tehessenek a megfigyelt korrelációt illetően, a FCsO minta esetében megfigyelt értékeket ismét Monte-Carlo szimulációk segítségével teszteltem. A határeloszlásokat ezúttal a következő módon vettem figyelembe: a galaktikus hosszúság ( $l$ ) koordináta mentén  $5^\circ$ -os felbontás mellett szimuláltam az értékeket, a galaktikus szélesség ( $b$ ) irányában azonban az eredeti eloszlás kvantiliseire voltam tekintettel. A szimulált felbontás tehát nem egyenlő szögtávolságú ráccsal készült, hanem azt vette figyelembe, hogy a rácsok között mindig a FCsO minta 10%-a helyezkedjen el.

#### 4.3.1. Vizsgálatok a teljes égbolton ( $0^\circ < l < 360^\circ, 3^\circ < |b| < 28^\circ$ )

A FCsO minta esetében megfigyelt és a szimulált minták esetében megfigyelt N/E(B-V) értékek eloszlását a 4.5. ábra mutatja. Látható, hogy a hurkok belsejében és a hurkokon megfigyelt várható értékek eloszlása közelítően megegyezik, míg a hurkok közötti térben magasabbnak várható a csillagkeletkezési aktivitás. Ezzel szemben az IN területeken kisebb az N/E(B-V) érték, mint az OFF pozíciókban, és az ON pozíciókban a



4.3. ábra. Az AKARI FCsO jelöltek  $db/W(CO)$  aránya a belső (felső ábra) és a külső (alsó ábra) Tejútrendszerben. Az ismert csillagkeletkezési területek irányában maximumok figyelhetők meg.



4.4. ábra. a) Az AKARI FCsO jelöltek  $db/W(CO)$  aránya az Orionban. Az eloszlásban egy gyűrűszerű alakzat figyelhető meg. b) Az IRAS által mért felületi fényesség 100  $\mu m$ -en, ugyanazon az égi területen. A felületi fényesség alapján egy gyűrűszerű alakzat rajzolódik ki. c) Az AKARI segítségével előállított FCsO minta forrásainak elhelyezkedése ugyanazon az égi területen. Az ellipszisek a területen található infravörös hurok belső és külső határait jelölik. Az IN, ON és OFF pozícióban elhelyezkedő FCsO jelölteket a narancssárga, piros és kék szimbólumok mutatják. A FCsO-ok a gyűrű mentén koncentrálnak.

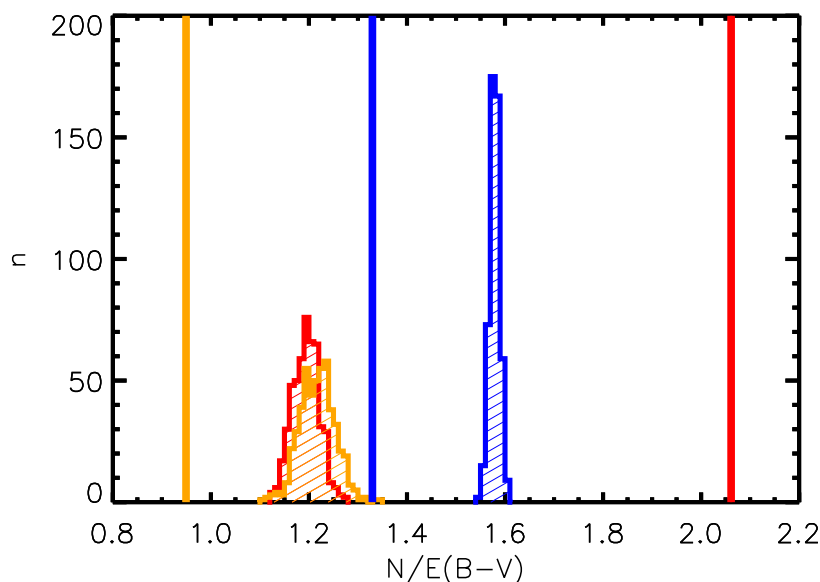
legmagasabb. A C3PO hideg csomók esetéhez hasonlóan a FCsO-ok esetében is a szimulált minta átlaga és a megfigyelt érték közötti különbséggel jellemeztem az eredmény statisztikai szignifikanciáját,  $\sigma$  (szimulált minták átlag körüli szórása) egységekben kifejezve. Az IN területeken a hiány  $6,75\sigma$ -nak adódott, az OFF területek esetében pedig  $25\sigma$ -nak. Az ON területeken megfigyelhető többlet értéke  $28,7\sigma$ . A részletes adatokat a

4.1. táblázat tartalmazza.

Ezek alapján tehát kijelenthető, hogy a hurkok által lefedett területen a jelenlévő por mennyiségéhez viszonyítva is jelentős többlet mutatkozik FCsO-ból, míg a hurkok belsejében és a hurkok közötti térben sokkal kisebb a FCsO-ok száma, mint amit a por mennyiségének eloszlásából és a csillagok felületi sűrűségéből várhatnánk.

4.1. táblázat. A megfigyelt és a szimulált  $N/E(B-V)$  értékek eloszlása az IN, ON és OFF régiók esetében a teljes égbolton.

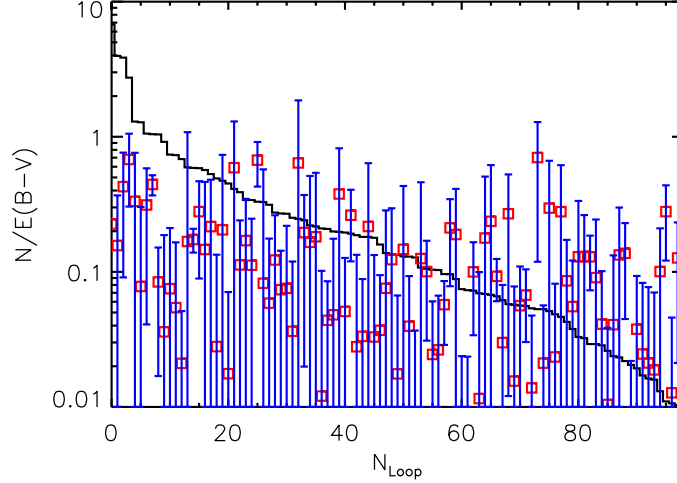
Terület	Megfigyelt	$MC_{AVG}$	$\sigma$	$MC_{MIN}$	$MC^{MAX}$
IN	0,95	1,22	0,04	1,11	1,34
ON	2,06	1,19	0,03	1,13	1,27
OFF	1,33	1,58	0,01	1,54	1,61



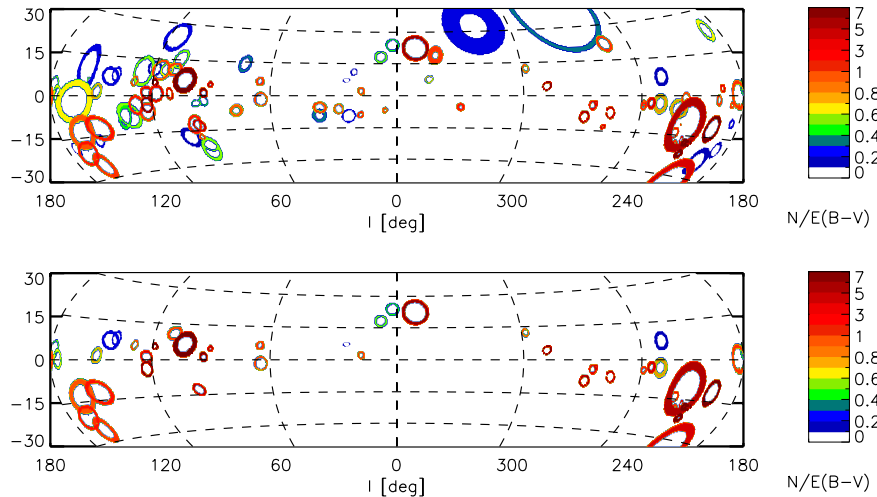
4.5. ábra. Az  $N/E(B-V)$  értékek eloszlása a teljes égre szimulált 500 db MC mintában (hisztogramok), valamint a megfigyelt mintában (függőleges vonalak) az IN (narancssárga), ON (piros) és OFF (kék) régiók esetében. Az ON területeken jelentős többlet, az IN és OFF területeken pedig hiány látható.

A hurkokon megfigyelhető átlagos többlet azonban adódhat abból is, ha egy, vagy csak néhány hurok extrém aktivitást mutat. Ezért a teljes égbolton elvégzett számításokat megismétltem az egyes infravörös hurkokra lebontva is. Az eredményt a 4.6. ábra szemlélteti. Azokban az esetekben, ahol a fekete vonal a hibahatárt jelző kék vonal felett található, a megfigyelt és a szimulált  $N/E(B-V)$  értékek közötti különbség meghaladja a  $3\sigma$  értéket, vagyis nagy biztonsággal kijelenthető, hogy az azokon a hurkokon megfigyelt  $N/E(B-V)$  többlet nem származhat a FCsO-ok véletlen elhelyezkedéséből.

A vizsgált területen 271 infravörös hurok helyezkedik el. Ezek közül 98 (36%) hurok esetében találtam a hurkok irányában látszó FCsO-ot (ld. 4.7. ábra, felső panel). A 98-ból 43 esetben állapítható meg, hogy a mutatott többlet szignifikáns (16%, ld. 4.7. ábra, alsó panel). A 43 szignifikánsan aktív hurokból 40 db a külső Galaxisban helyezkedik el ( $90^\circ < l < 270^\circ$ ). Ezért érdemesnek tartottam a hurkok aktivitását ezen a területen külön is megvizsgálni.



4.6. ábra. Az egyes infravörös hurkok aktivitását mutató hisztogram. A FCsO minta alapján számított  $N/E(B-V)$  értékek az egyes hurkokra lebontva, csökkenő sorrendben a fekete vonal jelzi. Az adott hurok esetében kapott szimulációs átlagot piros négyzettel jelöltem, a kék hibahatárok pedig a hozzátartozó  $3\sigma$  hibát mutatják. 43 db olyan hurok található, amely esetében a kékkel jelzett hibahatár nem éri el a fekete vonalat, azaz szignifikánsan aktív.



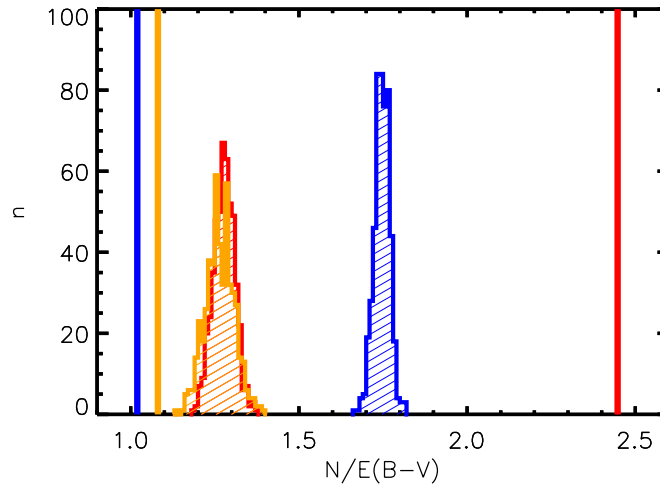
4.7. ábra. A csillagkeletkezési aktivitást mutató (felső ábra) és a szignifikánsan aktív (alsó ábra) infravörös hurkokon megfigyelt  $N/E(B-V)$  értékek a teljes égen, területtartó Aitoff vetületben. Az aktív hurkok 43%-a szignifikánsan aktív.

### 4.3.2. Vizsgálatok a külső Galaxisban ( $90^\circ < l < 270^\circ, 3^\circ < |b| < 28^\circ$ )

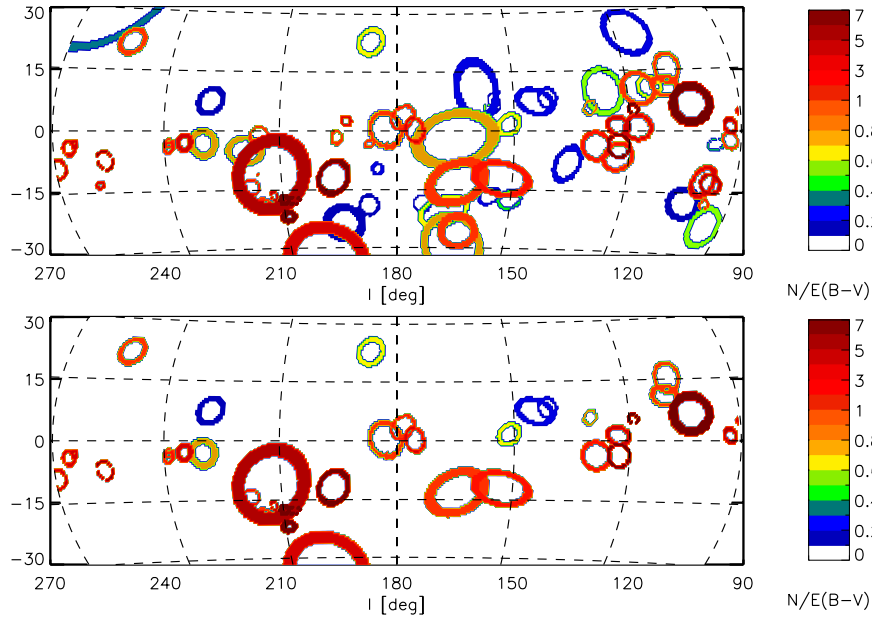
A külső Galaxis esetében ugyanazokat a vizsgálatokat végeztem el, mint a teljes égbolt esetében. A FCsO minta külső galaktikus eloszlásait követő Monte-Carlo szimulációkat ugyanazon módon hoztam létre, ahogy a teljes égbolt esetében is. A megfigyelt és a szimulált mintákban számított  $N/E(B-V)$  értékeket a 4.2. táblázatban foglaltam össze. Az eloszlást a 4.8. ábra mutatja. Az ábrán látható, hogy a teljes égbolton végzett szimulációkhoz hasonlóan a külső Galaxisban is a hurkok közötti térben várható a legnagyobb átlagos  $N/E(B-V)$  érték. A hurkok belsejében és a hurkokon ennél kisebb, nagyjából meg egyező értékek várhatóak. A FCsO mintában megfigyelt értékek azonban azt mutatják, hogy az  $N/E(B-V)$  érték alacsonyabb az IN és az OFF régiók esetében is, mint a várható, míg az ON területeken jóval magasabb a megfigyelt érték, mint a szimulációs átlag. Az IN és OFF területeken  $4,75\sigma$ , valamint  $36,5\sigma$  hiány mutatkozik, az ON területeken pedig  $38,7\sigma$  többlet figyelhető meg, tehát kijelenthető, hogy nagyon nagy valószínűség szerint a megfigyelt többlet nem adódhat a FCsO-ok véletlen elhelyezkedéséből.

4.2. táblázat. A megfigyelt és a szimulált  $N/E(B-V)$  értékek eloszlása az IN, ON és OFF régiók esetében a külső Galaxisban.

Terület	Megfigyelt	$MC_{AVG}$	$\sigma$	$MC_{MIN}$	$MC_{MAX}$
IN	1,08	1,27	0,04	1,13	1,39
ON	2,44	1,28	0,03	1,19	1,37
OFF	1,02	1,75	0,02	1,67	1,82



4.8. ábra. Az  $N/E(B-V)$  értékek eloszlása a külső Galaxisra szimulált 500 db Monte-Carlo mintában (hisztogramok), valamint a megfigyelt mintában (függőleges vonalak). Az IN és OFF régiók esetében hiány, az ON régiók esetében jelentős többlet látható.



4.9. ábra. A csillagkeletkezési aktivitást mutató (felső ábra) és a szignifikánsan aktív (alsó ábra) infravörös hurkokon megfigyelt  $N/E(B-V)$  értékek a külső Galaxisban, területtartó Aitoff vetületben. A csillagkeletkeztető hurkokon az átlagos  $E(B-V)$  többlet értéke 12%-kal magasabb, mint a többi hurok esetében.

A 2.3.2 fejezetben megmutattam, hogy az infravörös hurkokon a vörösödés mértéke átlagosan 32%-kal magasabb, mint a hurkok belső irányában látszó minimumérték. A jelen esetben vizsgált területen ez az érték 38%. Külön-külön kiszámítottam az átlagos vörösödés értékét azokon a hurkokon, amelyeken nem találtam csillagkeletkezési aktivitást, illetve azokon, amelyek irányában van FCsO és amelyeket szignifikánsan aktívnek találtam. A csillagokat nem keletkeztető hurkok esetében az átlagos  $E(B-V)$  többlet értéke 33%. Az aktív és a szignifikánsan aktív hurkok esetében pedig megegyező, 45%-ot találtam. Tehát a FCsO nélküli hurkokon alacsonyabb az átlagos vörösödéstöbblet értéke.

#### 4.4. Az infravörös hurkok aktivitását kiváltó tényezők

Az infravörös hurkokat több fizikai folyamat is kialakíthatja. A katalógus készítői (Kiss és mtsai. 2004, Könyves és mtsai. 2007) megvizsgálták, hogy melyek azok az objektumok, amik azonos irányban látszanak a hurkokkal és esetlegesen létrehozhatták azokat. A 4.3. táblázatban foglaltam össze, hogy melyik hurkokat találtam szignifikánsan aktívnek, illetve azt is, hogy milyen mértékben. Ezek mellett a táblázat azt is tartalmazza, hogy a katalógus alapján az adott hurok irányában található-e valamilyen asszociált objektum, és ha igen, akkor az milyen típusú. A következőkben átnézem, hogy az asszociált objektumok természetük miatt felelősek lehetnek-e olyan fizikai fo-

lyamatok beindításáért, amely buborék- vagy hurokszerű objektumot hozhatnak létre és megnövekedett csillagkeletkezési aktivitást eredményezhetnek.

**G089+04** A GIRL katalógus alapján a hurok belsejében egy szupernóva maradvány (továbbiakban SNR) található. Ezt az objektumot részletesen tanulmányozta Tatematsu és mtsai. (1990). CO, HI és rádió kontinuum vizsgálataik szerint a HB 21 jelű SNR kölcsönhatásban van a körülötte található csillagközi anyaggal. A keleti oldala egy majdnem egyenes "fal", ami atomos és molekuláris gázból áll. Az atomos anyag eloszlása szinte teljesen homogén, míg a molekuláris anyag csomósodást mutat. 3 CO csomó figyelhető meg a területen, ezek közül kettő állhat kapcsolatban a HB21-el. A gáz kinetikus sebessége alapján a HB 21 a Cyg OB7 asszociáció része lehet. Byun és mtsai. (2006)  $^{12}\text{CO}$   $J = 1 - 0$  méréseket végeztek a SNR teljes területén. Olyan felhőket találtak, amelyeket külső hatás ért - erre a széles, 10 km/s-ot meghaladó emissziós vonalszélességből következtettek.

**G181-03** A GIRL katalógus alapján a hurok belső területén nem található olyan objektum, amely a hurok létrejöttét gerjeszthette volna. A hurokra illesztett ellipszis félnagyengelyének megfelelő keresősugarat használva a SIMBAD katalógus sem listáz a gerjesztéssel összefüggésbe hozható forrásokat.

**G182+00** A hurok belső területén és a hurkon is található több HII zóna is. A belsejében az S240 és az S242 jelű, míg a hurkon az S241 és S243 elnevezésű ionizált HII zóna van. A SIMBAD kereső segítségével a fél-nagyengelynek megfelelő keresősugáron belül összesen 15 HII zónát találtam, valamint 4 db SNR-t. Kronberger és mtsai. (2006) olyan nyílt halmazt azonosítottak, amely feltehetőleg asszociált az S240 jelű HII zónával. Az S241 jelű HII régiót részletesen elemezte Anderson és mtsai. (2012). A Herschel Űrobszervatórium mérései alapján számos sűrűsödést találtak a régióban.

A **G186+22** esetében a GIRL katalógus nem listáz asszociált objektumot a hurok belső területein, és a SIMBAD katalógusban sem találtam olyan objektumot, ami magyarázhatná egy GIRL létrejöttét.

**G195-11** A GIRL katalógus a hurok belsejében és a hurkon is listáz asszociált HII régiókat. A SIMBAD alapján is 13 HII zóna található a terület irányában. A hurok belsejében található S264 elnevezésű HII zóna, más néven  $\lambda$  Ori Molekulagyűrű, egy ismert objektum. A HII zóna gerjesztő csillaga az O8 spektráltípusú  $\lambda$  Ori. A molekulagyűrűben zajló indukált csillagkeletkezést vizsgálta többek között Lee és mtsai. (2005), akik azt a következtetést vonták le, hogy az OB csillagok ionizációs frontja képes annyira összenyomni a csillagközi anyagot, hogy abban megindulhasson a fiatal csillagok keletkezése. Ez főleg akkor igaz, ha a  $100\mu\text{m}$ -es háttérfényesség kellően magas, ami a sűrűbb területek egyik indikátora. Ezen kívül megállapították, hogy a fényes, gyűrű alakú felhők (BRC) esetében a csillagkeletkezés a külső, nagyobb nyomású részekben megy végbe.

**G199-33** A hurkon található több HII zóna is. Egyik objektumról sem született



4.3. táblázat. A külső Galarisban szignifikánsan aktívnak mutató hurkok listája. Az oszlopok jelentése: 1) A hurkok azonosítója, 2) A FCsO minta alapján a hurkon megfigyelt  $N/E(B-V)$  érték, 3)-4) Az 500 db Monte-Carlo szimuláció alapján számított átlagos  $N/E(B-V)$  érték és az átlag körüli szórás, 5) a szignifikancia mértéke  $\sigma$  egységben kifejezve, 6)-7) asszociált objektum jelenléte az infravörös katalógusban IN és ON pozíciókban.

Név	$N/E(B-V)_{FCsO}$	$N/E(B-V)_{MTC}$	$\sigma$	Szignifikancia	Assz. Obj. IN	Assz. Obj. ON
G089+04	3,68	0,21	0,40	8,68	SNR	TT
G181-03	2,10	0,24	0,40	4,62	-	DC, MC, TT
G182+00	1,03	0,12	0,09	10,39	HII	HII, DC, MC, TT
G186+22	0,69	0,06	0,20	3,12	-	DC
G195-11	10,40	1,74	0,31	27,53	HII	HII, DC, MC, TT
G199-33	3,40	0,54	0,29	9,79	PSR, DC, MC, TT	HII, DC, MC, TT
G206-17	68,03	2,16	1,69	39,04	MC, TT	HII, DC, ASSOC, MC
G208-21	12,80	5,11	1,84	4,17	TT	HII, DC, MC, TT
G209-17	39,69	1,65	0,74	51,41	TT	TT
G211-16	5,67	1,90	1,22	3,09	DC, MC	DC
G212-11	5,88	1,05	0,09	53,93	DC, PSR, MC	HII, DC, ASSOC, MC, TT
G214-18	1,82	0,57	0,24	5,28	-	DC, MC, TT
G217-14	3,14	0,88	0,48	4,66	MC, TT	MC
G227+07	0,16	0,00	0,00	-	-	MC, TT
G229-03	0,73	0,11	0,09	6,61	DC, MC	HII, DC, MC, TT
G234-02	4,51	0,28	0,21	20,13	TT	HII, DC, MC, TT
G238-03	1,87	0,45	0,45	3,16	DC	DC, MC, TT
G238-04	2,51	0,52	0,32	6,28	DC, MC, TT	DC, MC, TT
G252+21	1,30	0,00	0,03	44,68	-	DC
G255-07	7,38	1,15	0,57	10,86	DC	DC
G263-03	4,92	0,38	0,41	11,17	-	DC
G265-04	3,89	0,81	0,39	7,90	DC	DC, MC
G268-09	5,02	1,68	0,69	4,80	DC	DC, MC, TT
G099+03	38,52	2,86	0,89	40,02	HII, DC, TT	DC, MC
G102+06	10,35	4,60	0,25	22,90	HII, DC, ASSOC, MC, TT	HII, DC, MC, TT
G107+15	1,08	0,20	0,12	7,60	DC, TT	HII, DC, MC, TT
G109+10	1,04	0,35	0,14	4,95	DC, MC, TT	DC, MC, TT
G118+05	24,46	5,92	1,13	16,35	ASSOC	HII, DC, MC, TT
G122-03	11,23	1,63	0,65	14,73	DC, IN	HII, DC, MC, TT
G122+01	4,25	0,70	0,43	8,17	HII, ASSOC, MC	HII, ASSOC, DC, MC, TT
G128-03	2,77	1,06	0,43	3,98	HII, DC, TT	HII, DC, ASSOC, TT
G129+05	1,00	0,00	0,00	-	-	DC
G140+08	0,26	0,00	0,00	-	DC	DC, MC, TT
G143+07	0,27	0,00	0,00	-	DC, MC, TT	DC, ASSOC, MC
G150+01	0,67	0,00	0,00	-	HII, DC, MC	HII, DC, MC, TT
G152-12	2,47	1,03	0,21	6,86	MC, TT	DC, MC, TT
G163-13	1,73	1,03	0,12	5,98	-	-
G174+00	3,11	0,05	0,19	15,98	HII, DC, ASSOC, MC	HII, DC, MC
G177+03	2,47	0,00	0,00	-	DC, SNR, MC	-
G092+01	5,46	0,05	0,21	25,63	DC, MC, TT	DC, MC, TT

eddig részletes publikáció. A GIRL területének irányában a SIMBAD alapján 27 db HII zóna is található, azonban valószínűleg nem mindegyik kapcsolható az infravörös hurokhoz.

**G206-17** Az infravörös gyűrűn HII zóna és OB asszociáció is található a GIRL katalógus alapján. Az S277 jelű HII régiót Morgan és mtsai. (2004) tanulmányozta 43 másik BRC objektummal együtt rádió és közép-infravörös hullámhosszakon, és azt találták, hogy néhány esetben a BRC-k nagyon közeli kapcsolatban vannak a közepes- és nagytömegű csillagkeletkezéssel. A hurok irányában található az Ori OB1 asszociáció, amellyel kapcsolatban több, mint 440 publikáció született eddig. Lee & Chen (2009) tanulmányozta az asszociáció körül található Orion-Eridanus szuperbuborék csillagkeletkezési hatékonyságát. Ezt a szuperbuborékot a GIRL katalógus **G212-11** névvel azonosítja. Egyik konklúziójuk, hogy a táguló szuperbuborék az Ori OB1 irányából indult, és a tágulás közben több kisebb FCsO csoportot és fragmentált struktúrát is létrehozott. Ennek bizonyítéka a FCsO-ok korának eloszlása is a területen. A kisebb struktúrák szintén megtalálhatók a GIRL katalógusban: **G208-21**, **G209-17**, **G211-16**, **G214-18** és **G217-14** névvel. Ezek a hurkok mind aktívabbnak mutatkoznak, mint ahogy a csillagok véletlen eloszlása alapján várjuk.

**G227+07** A GIRL katalógus alapján a hurok belső területein és magán a hurkon sincs olyan objektum, ami a hurok létrejöttét gerjeszthette volna. Ezt megerősíti a SIMBAD katalógus is, ahol nem találtam sem csillagasszociációt, sem szupernóvamaradványt, sem HII régiót a GIRL irányában.

**G229-03** Három darab HII zóna található a hurok irányában. Az S297 jelű HII zóna csillagkeletkezési aktivitását vizsgálta Mallick és mtsai. (2012), és azt találták, hogy a gerjesztő forrás egy B0V spektráltípusú csillag, a HD 53623. A FCsO-ok térbeli és kor szerinti eloszlása arra utal, hogy a csillagkeletkezést a HD 53623 indukálta. Az S298 jelű, másnéven NGC 2359 HII zóna közepén egy Wolf-Rayet típusú csillag található, amelynek a csillagszele létrehozta azt a buborékot, amelyben az ionizált anyag tömege  $\sim 70M_{\odot}$  és a teljes tömege  $\sim 1000M_{\odot}$  (Stock & Barlow, 2010). Az S301 jelű HII zónával kapcsolatban Jung és mtsai. (1996) végeztek kutatásokat és azt találták, hogy a GS234-02 elnevezésű szuperbuborék, amelynek a falában helyezkedik, egy  $\sim 10km\,s^{-1}$  sebességgel táguló HI buborék, és valószínűsíthetően csillagok újabb generációinak létrejöttét indukálta. A HI buborék létrejöttéért SN robbanások lehetnek felelősek. Az S302 az infravörös hurok olyan részén található, amely átfedésben van a **G234-02** jelű GIRL-el, tehát az azon megfigyelhető FCsO többletet is ez a HII zóna okozza.

A **G238-03** és **G238-04** elnevezésű hurkok szintén nagy átfedést mutatnak. A GIRL katalógus alapján ennek a két huroknak az irányában nem található olyan objektum, ami a buborékszerű alakot indokolná. A SIMBAD katalógusban azonban megtalálható 2 HII zóna, amely az infravörös hurkok irányában található. Az LBN 1060 jelű HII zónával

kapcsolatban egy publikáció sem található, és az LDN 1061 jelűvel kapcsolatban is mindössze egy: Gyulbudaghian & May (1999) egy 54 tagú OB asszociációt felfedezéséről írt, amely kapcsolatban áll a környező sötét molekulafelhőkkel - ezek a felhők alkotják az infravörös hurkokat.

A **G252+21** jelű GIRL esetében nem található olyan objektum, amely kapcsolatba hozható a hurok létrejöttével. A hurok irányában a SIMBAD katalógus több SN-t és HII zónát is listáz, ezek azonban extragalaktikus eredetűek.

**G255-07** A GIRL katalógus és a SIMBAD katalógus alapján sem található a hurok irányában olyan forrás, ami gerjeszthette egy ilyen struktúra létrejöttét, azonban több nyílthalmaz is található az irányában (NGC 2477, NGC 2451).

A **G263-03** irányában látszik az egyik legtöbbet tanulmányozott SNR, a Vela. A Vela SNR azonban jóval nagyobb kiterjedésű, mint amekkora az infravörös hurok látszó átmérője, így valószínűleg nem önálló struktúráról van szó, hanem arról, hogy a hurok csak egy része a szupernóvaradványnak. Ugyanez mondható el a **G265-04** és a **G268-09** esetében is, melyek szintén a  $\sim 8^\circ$  átmérőjű szupernóvaradvány irányában látszanak.

A **G099+03** belső területeinek irányában található az S131 jelű HII régió. Getman és mtsai. (2012) tanulmányozta a gerjesztő O6.5f spektráltípusú HD 206267 jelű csillag és az azt körülvevő ionizált régió kapcsolatát. Chandra röntgen, Spitzer IR és optikai FLWO/LAICA adatok alapján azonosítottak FCsO-okat a régióban, melyek térbeli eloszlása, valamint a korszekvenciák alapján kijelenthető, hogy a régióban található csillagok több, mint 25%-ának kialakulását a központi csillag gerjesztette.

A **G102+06** jelű GIRL, más néven a Cepheus buborék belső területének irányában 2, míg a gyűrű irányában 7 darab HII zóna található. Ábrahám és mtsai. (2000) részletesen tanulmányozta a buborék morfológiáját és kinematikáját. A porból álló gyűrű HI struktúrákat is tartalmaz, ami a Cep OB2 asszociáció idősebb alcsoportja körül egy majdnem teljes gyűrűt rajzol ki. A gyűrű tágulási sebessége  $\sim 33\text{ km s}^{-1}$ , ezt a tágulást pedig legjobban egy 1,7 millió évvel ezelőtti szupernóva robbanással lehet magyarázni. Mivel ez a kor alacsonyabb, mint a buborék bizonyos részeinek életkora, ezért valószínű, hogy a szupernóva már egy korábbi üregben robbant. A táguló lökeshullám pedig kölcsönhatásba lépett a buborék belső falában található korábbi csillagkeletkezési területekkel, és a csillagkeletkezés új hullámát indította be.

**G107+15** A GIRL falának irányában található az S136 jelű HII régió. Az irodalomban összesen 8 cikk említi ezt a régiót, melyek nem kutatták részletesen a csillagkeletkezésre gyakorolt hatását.

**G109+10** A GIRL katalógus alapján a hurok belsejében és a hurkon nem található olyan asszociált objektum, ami a porhéj létrejöttét indokolná. A SIMBAD katalógus alapján azonban a GIRL falának irányában 5 darab HII régió található. Ezek csillagke-

letkezésre gyakorolt hatásait azonban egy publikáció sem taglalja.

A **G118+05** belső területeinek irányában található az S171 HII zóna, valamint a Cep OB4 asszociáció. A HII zóna kialakulását az említett OB asszociáció gerjesztette. Chauhan és mtsai. (2009) tanulmányozta a régiót, ahol 3 BRC objektum is található. A Be 59 jelű csillagcsoport, ami a HII zóna közepén helyezkedik el, 9 darab O7-B3 spektráltípusú csillagot tartalmaz. Vizsgálataik szerint a HII zóna belső, fényes falán és a falban 11 darab FCsO található, és 13 darab olyan csillag, amely infravörös többletet mutat, míg a HII zónán kívül nem találtak ilyen csillagokat.

**G122-03** A GIRL falának irányában egy planetáris köd és 2 darab HII zóna található. Az S184 jelű (másnével NGC 281) HII régióról Koenig és mtsai. (2012) végzett részletesebb vizsgálatokat. Az objektum sajátmozgásának vektora a galaktikus fősík irányából magasabb galaktikus szélességek felé mutat, nagysága 15 és 30  $\text{km s}^{-1}$  közé esik. Megemlíti, hogy Rygl és mtsai. (2010) és Sato és mtsai. (2008) szerint is a HII zóna egy nagyobb, táguló buborék szélén helyezkedik el. A FCsO-ok a 12  $\mu\text{m}$ -en jól megfigyelhető HII buborék belsejében és a perifériáján helyezkednek el. Az S185 jelű HII zónát tanulmányozta Cazzolato & Pineault (2003) a Cas OB7 asszociáció és a körülötte található csillagközi anyag kapcsolatának vizsgálatakor. Eredményeik között szerepel, hogy az OB asszociációhoz kapcsolódóan egy HI buborékot fedeztek fel, ami felelős lehet újgenerációs csillagok születéséért, de a FCsO-ok vizsgálatára nem tértek ki munkájukban.

A **G122+01** jelű GIRL irányában 8 darab HII zóna található, ebből 4 a belső üreg irányában. Továbbá látható 2-2 OB asszociáció az üreg és a fal irányában. A hurok ugyanahhoz a Cas OB7 asszociációhoz köthető, amelyet a **G122-03** esetében már említettem (Cazzolato & Pineault 2003).

**G128-03** A GIRL fala irányában található egy HII zóna, valamint egy OB asszociáció is. Kang & Kerton (2012) az S187 jelű HII zóna falában található IRAS 01202+6133 pontforrást vizsgálta részletesen annak érdekében, hogy kiderüljön, indukált csillagkeletkezés hatására jöhetett-e létre a FCsO. Eredményül azt kapták, hogy a csillag a HII zóna tágulása miatt alakulhatott ki.

A **G129+05** jelű hurok esetében a GIRL katalógus nem listáz gerjesztő objektumot. A SIMBAD katalógusban 2 darab HII zóna található ebben az irányban, de egyik objektumot sem tanulmányozták eddig részletesen.

**G140+08** A GIRL irányában nem található olyan objektum, ami a csillagok létrejöttének gerjesztéséért lehetne felelős.

A **G143+07** falának irányában található a Cam OB1. Gutermuth és mtsai. (2009) vizsgálta az asszociációhoz kapcsolódó AFGL 490 csillagkeletkezési régiót, amelyben 161 FCsO-ot azonosítottak. Lyder (1998) vizsgálta a Cam OB1-hez kapcsolódó csillagkeletkezést és azt a következtetést vonta le, hogy a régióban létrejött fiatal csillagok keletkezését több csillagközi felhő ütközése gerjeszthette.

A **G150+01** üregének irányában 2, míg a hurok irányában 4 darab HII régió található. Az üreg területén elhelyezkedő S207 jelű objektum esetében azonban nem tisztázott, hogy HII régióról, vagy planetáris ködről van-e szó. A hurok irányában több FCsO objektum is található, de ezek kialakulásáról, illetve a HII zónák csillagkeletkeztető hatékonyságáról nem találtam publikációt.

**G152-12** A GIRL irányában található HII zónákról katalógusbejegyzéseken kívül nem találtam egyéb publikációt. Az irányában látható katalogizált SN robbanások mind extragalaktikus eredetűek.

A **G163-13** GIRL belső üregének irányában két HII zóna látható. Az S222, más néven NGC 1579 nevű objektum és a környező molekulafelhők csillagkeletkezését Herbig és mtsai. (2004) vizsgálta. A halvány  $H\alpha$ -emissziót mutató fiatal csillagpopuláció korát  $\sim 0,5$  millió évesre becsülik.

**G174+00:** A GIRL belső területei irányában két HII zóna és két OB asszociáció, a hurkon pedig további 3 HII régió is látható. Kang és mtsai. (2012) tanulmányozta ezt a területet, és HI mérések alapján azt találták, hogy  $\sim 0,33$  millió évvel ezelőtt történhetett egy szupernóva robbanás, amely létrehozta azokat az OB asszociációkat, amik a HII zónákban találhatók. Itt megjegyezném, hogy a  $\sim 0,33$  millió éves szupernóvára a cikkben viszonylag öreg robbanásként hivatkoznak, vagyis a millió év valójában milliárd év lehet, ami jobban összhangban van azzal is, hogy a robbanás új csillagok létrejöttét indukálta.

A **G177+03** belső üregének irányában található a G179.0+02.6 jelű SNR. Csillagkeletkeztető hatását azonban eddig senki nem vizsgálta.

A **G092+01** GIRL-t alkotó sötét molekulafelhők a Cygnus csillagkeletkezési terület részét képezik. A területről és a Cygnus superbuborékról részletes tanulmányt publikált Uyaniker és mtsai. (2001). Eredményeik szerint a Cygnus irányában buborék helyett egy hengerbe látunk bele, ez a henger pedig az Orion spirálkar. A spirálkarban elhelyezkedő, különböző heliocentrikus távolságú szupernóva maradványok és HII zónák a vetítés miatt egy buboréknak tűnő alakzatot alkotnak.

## 4.5. AKARI FCsO-ok a Herschel Cold Cores mezőkben

A 2.4.2. fejezetben megvizsgáltam, hogy a Herschel űrtávcső által feltérképezett hideg magok fizikai paraméterei mutatnak-e szignifikáns eltérést attól függően, hogy hol helyezkednek el az infravörös galaktikus hurkokhoz képest. Az AKARI FCsO jelölt minta segítségével megvizsgáltam azt is, hogy a csillagkeletkezési aktivitásban mutatnak-e eltérést a hideg magok az elhelyezkedésüktől függően. A vizsgálathoz Juvela és mtsai. (2012) által publikált táblázatot használtam, amely a hideg magok méretét is listázza, pontosabban annak az apertúrának a nagyságát, amely alapján a különböző fizikai paramétereket

vizsgálták. Azt vizsgáltam, hogy az apertúra nagyságával megegyező, kétszeres, valamint négyszeres sugáron belül hány FCsO jelölt helyezkedik el. Az eredményeket a 4.4. táblázatban foglaltam össze.

Ahogy a táblázatból is jól kivehető, hogy az ON területek esetében több olyan hideg mag található, amelyekben van legalább 1 darab AKARI FCsO. Ha megvizsgáljuk a FCsO-val rendelkező hideg magok számát, akkor az is látható, hogy négyszeres apertúra-sugáron belül az IN esetben az átlagos csillagszám 4, az ON esetben 4,1 az OFF esetben pedig 1,5. Tehát azoknak a magoknak a környezetében, amelyek az infravörös hurkok belsejében, vagy a hurkokon helyezkednek el, nagyobb az egy magra jutó FCsO szám, mint azoknál a hideg magoknál, amelyek semmilyen módon sem látszanak kapcsolatban lenni a hurkokkal. Szintén megállapítható, hogy a négyszeres sugáron belül elhelyezkedő FCsO-ok száma az összes IN mag esetében 0,4, az ON magok esetében 1,1, az OFF magok esetében pedig szintén 0,4. Tehát az ON magok esetében az átlagos FCsO szám kétszeresen meghaladja a többi területen elhelyezkedő magokkal látszólagosan asszociált FCsO-ok számát.

4.4. táblázat. *A Herschel által lemért hideg magok környezetében megtalálható AKARI FCsO-ok száma. Az oszlopok jelentése a következő: (1)A porhéjakhoz viszonyított elhelyezkedés, (2) Az adott területen elhelyezkedő hideg magok összesített száma, (3)-(4) Az olyan hideg magok száma, ahol az magokra illesztett egyszeres apertúra sugáron belül található legalább 1 darab AKARI FCsO, valamint ezen FCsO-ok összesített száma. (5)-(6), valamint (7)-(8) ugyanaz, mint a (3)-(4), de kétszeres, valamint négyszeres apertúrasugárral.*

Terület	Összes $N_{CC}$	$r = 1\times$		$r = 2\times$		$r = 4\times$	
		$N_{CC}$	$N_{FCsO}$	$N_{CC}$	$N_{FCsO}$	$N_{CC}$	$N_{FCsO}$
IN	19	1	2	1	5	2	8
ON	47	8	11	10	17	13	53
OFF	36	3	4	4	6	10	15

A 2.6. táblázathoz hasonlóan készítettem el a 4.5. táblázatot. Annak a vizsgálatnak az eredményeit foglaltam ebben össze, aminek során a hideg magok fizikai paramétereiben nem csak a hurkokhoz viszonyított elhelyezkedésük alapján próbáltam különbséget tenni, hanem az alapján is, hogy a magra illesztett apertúra méretének négyszeresével megegyező távolságon belül található-e FCsO, vagy sem. A táblázatban látható, hogy sem az apertúrán belül becsült, sem a háttérlevont hőmérsékletek esetében nem látható számottevő eltérés attól függően, hogy az adott mag környezetében találtam-e FCsO-t, vagy sem. Az  $N$  oszlopsűrűség és a becsült tömegek esetében viszont megfigyelhető, hogy azok a magok, amelyekben található FCsO, átlagosan nagyobb sűrűségűek és nagyobb tömegűek. Bár ez a különbség sem mondható szignifikánsnak, az IN területek esetében azonban a tömegek eltérése kívül esik az átlag körüli szóráson. A zárójelekben

feltüntetett mediánértékek is azt mutatják, hogy az IN, ON és OFF esetekben is nagyobb tömegűek azok a magok, amelyekben található FCsO, ezen kívül a sűrűségük is magasabban meghaladja azon magok sűrűségét, amiknek a közelében nem találtam FCsO-t. A táblázatból az is látható, hogy az előzőekben megállapított magas FCsO arány az ON magok esetében viszonylag alacsony tömeggel párosul. Ez alapján feltételezhető, hogy ezek a magok a tömegük nagyobb részét alakították már csillaggá, mint az IN, vagy OFF magok, vagy pedig a külső hatások miatt kisebb tömeg is elegendő volt ahhoz, hogy beinduljon a csillagkeletkezés.

4.5. táblázat. A Herschel SPIRE műszerével megfigyelt hideg felhőmagok fizikai paramétereinek átlagos értéke, az átlag szórása, valamint a medién értéke (zárójelben) az IN, ON és OFF területeken azokban az esetekben, amikor a négyszeres apertúrasugáron belüli  $N_{FCSO} = 0$  és amikor  $N_{FCSO} > 0$ .

Terrület	$N_{FCSO}$	$T$ [K]	$N$ [ $10^{21} \text{ cm}^{-2}$ ]	$M$ [ $M_{\odot}$ ]	$T^{bg}$ [K]	$M^{bg}$ [ $M_{\odot}$ ]
IN	$> 0$	14,4(14,7) $\pm 0,4$	28,8(49,0) $\pm 28,6$	566,5(588,0) $\pm 30,4$	12,4(12,5) $\pm 0,2$	262,0(337,0) $\pm 106,1$
	$= 0$	14,7(14,6) $\pm 0,5$	8,0(4,9) $\pm 2,6$	57,4(14,9) $\pm 11,0$	13,3(13,6) $\pm 1,1$	16,2(6,3) $\pm 6,3$
ON	$> 0$	14,5(14,1) $\pm 1,3$	25,6(17,0) $\pm 19,0$	187,9(163,0) $\pm 171,4$	13,2(12,6) $\pm 1,8$	102,6(55,0) $\pm 124,6$
	$= 0$	14,1(14,1) $\pm 1,0$	8,8(8,3) $\pm 6,2$	115,4(18,2) $\pm 27,8$	12,4(12,4) $\pm 1,5$	40,0(7,3) $\pm 9,2$
OFF	$> 0$	15,3(15,4) $\pm 1,7$	21,4(21,0) $\pm 13,3$	744,2(406,0) $\pm 265,0$	13,1(13,5) $\pm 2,1$	295,1(222,0) $\pm 171,0$
	$= 0$	14,6(14,4) $\pm 1,0$	9,9(9,1) $\pm 6,5$	243,8(29,0) $\pm 54,0$	12,9(12,7) $\pm 1,0$	96,2(10,4) $\pm 20,8$



## 5. fejezet

# A WISE FCsO jelöltek

A WISE műhold és műszereinek alapvető tulajdonságait a 3.6. fejezetben bemutat-  
tam. A mérései alapján előállított katalógus (Cutri és mtsai, 2012) 563 921 584 forrásról  
tartalmaz pozíció, fényesség, stb. adatokat. Ekkora mennyiségű adat kezelése hagyo-  
mányos asztali, vagy hordozható számítógépekkel nem lehetséges, így a FCsO jelöltek  
azonosítását egy jóval kisebb elemszámú almintán végeztem.

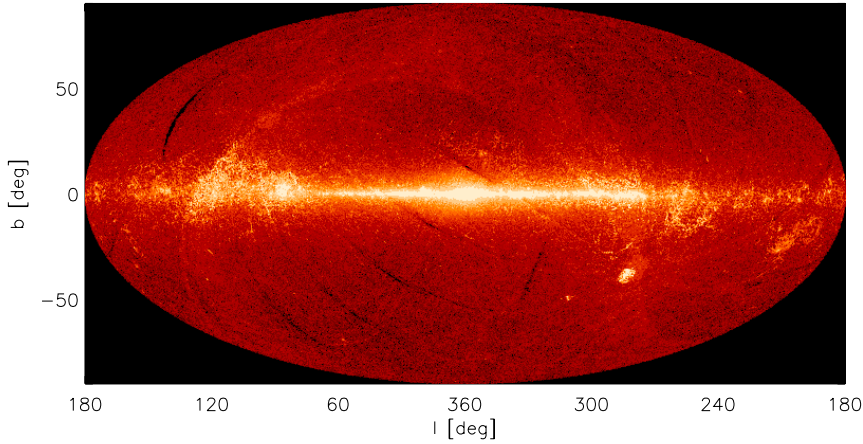
A kisebb alminta kiválasztásának célja nem csupán a kezelendő adatmennyiség csök-  
kentése volt. Annak érdekében, hogy megbízható mintát állíthassak elő, tekintettel vol-  
tam az adatok minőségére is. Ezt a WISE katalógus "*ph\_qual*" azonosítója segítségével  
vettem igénybe. Azokat a forrásokat használtam, amelyeknél a négy fotometriai sávból  
legalább három esetben a fotometria minősége "A", vagyis a jel/zaj arány nagyobb, mint  
10. A maradék egy sávban megengedtem a "B" fotometriai minőséget is, vagyis a jel/zaj  
arány nagyobb, mint 3. Ezen kívül megköveteltem, hogy a forrásoknak legyen 2MASS  
(Cutri és mtsai, 2003) asszociáltja is, és mindhárom 2MASS sávban ( $J, H, K_s$ ) elérhető  
legyen fotometriai adat. Így egy olyan WISE alminta állt elő, amely 6 568 012 forrás  
adatait tartalmazza.

Az alminta forrásainak felületi sűrűség-eloszlását az 5.1. területtartó ábra mutatja.  
Ahogy az ábrán látható, a források nagyrészt a galaktikus fősík irányában koncentráló-  
dnak. A  $|b| < 5^\circ$  sávban található a források  $\sim 61\%$ -a. Megnövekedett felületi sűrűség  
látható még az ekliptikai pólusok környékén, amely a WISE megfigyelési stratégiájának  
köszönhető.

### 5.1. A FCsO azonosítás lépései

#### 5.1.1. Statisztikai módszerek

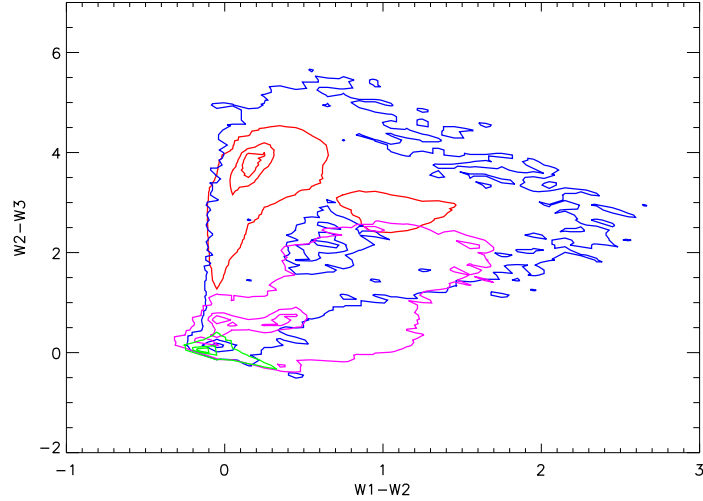
Ahogy az AKARI FIS források esetében, úgy a WISE objektumok esetében is kvadra-  
tikus diszkriminancia analízis (QDA, ld. 3.5. fejezet) segítségével végeztem a klasszifiká-



5.1. ábra. A WISE almlinta forrásainak galaktikus felületi sűrűség-eloszlása területtartó Aitoff-vetületben. A logaritmikus színskála  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  felbontás mellett mutatja a felületi sűrűség értékét  $10^{-1}$  és  $10^3$  értékek között.

ciót. Első lépésként ez alkalommal is létrehoztam egy tanító mintát a SIMBAD katalógus segítségével. A WISE forrásokhoz tartozó asszociáltakat  $5''$  nagyságú sugárral kerestem, és mindig a legközelebbi forrás főtípusát rendeltem hozzá az adott WISE objektumhoz. Az így azonosított források eloszlását a (W1-W2) - (W2-W3) szín-szín diagramon az 5.2. ábra mutatja. Az ábrán jól látható, hogy az egyes forrástípusok közötti határok nem lineárisak, így indokolt a diszkriminancia analízis kvadratikus formájának használata. A WISE adatbázisban elérhető információk közül a QDA során a következő adatokat használtam:  $J - H$ ,  $H - K_s$ ,  $K_s - W1$ ,  $W1 - W2$ ,  $W2 - W3$  és  $W3 - W4$  színek, a  $W1$  magnitúdó, valamint a forrás kiterjedését leíró "EXT" paramétert.

A későbbiekben a létrehozott FCsO jelölt mintában megpróbáltam szétválasztani a forrásokat a fejlődési állapotaiknak megfelelően Class I, Class II és Class III altípusokba. A QDA segítségével kapott eredmények megbízhatósága azonban nem volt elfogadható, így egy másik klasszifikációs eljárást alkalmaztam, a Support Vector Machine-t (továbbiakban SVM). A SVM olyan tanuló algoritmus, amelyet Vladimir Vapnik (Vapnik 1995) fejlesztett ki nemlineáris modellek kiterjesztéseként azzal a céllal, hogy többdimenziós paraméterterben klasszifikáljon. Az ilyen típusú algoritmusok a többdimenziós térben az objektumok relatív pozíciója alapján klasszifikálnak, a relatív pozíciót pedig egy döntési síktól (az angol szakirodalomban "decision plane") mérik. A QDA-hoz hasonlóan a SVM-nak is szüksége van egy tanítómintára, amely alapján a további forrásokat klasszifikálni tudja. Az algoritusról bővebb leírást ad pl. K. Malek és mtsai (2013).

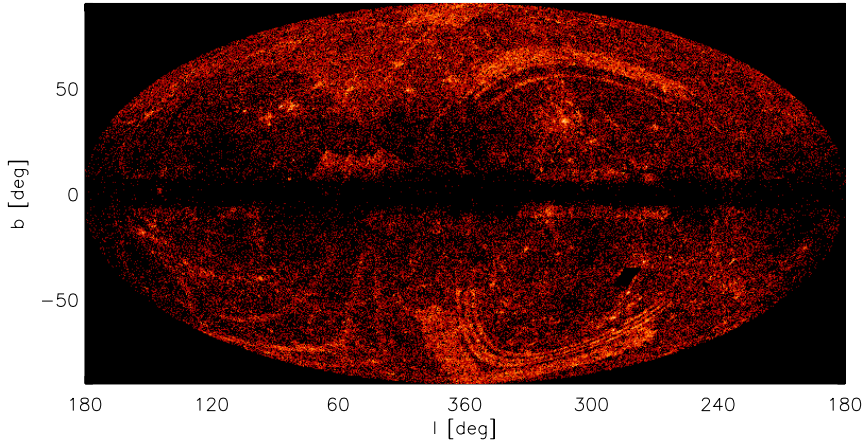


5.2. ábra. A *SIMBAD* segítségével azonosított források szín-szín diagramon számított felületi sűrűségének kontúrtérképe. A felületi sűrűséget 0,1 magnitúdó nagyságú közők alapján számítottam, a kontúrvonalak minden típus esetében a maximális érték 5%-át, 50%-át és 75%-át mutatják. A piros kontúrvonalak az extragalaktikus forrásként azonosított forrásokat mutatják, a zöld vonalak a mezőcsillagokat, a rózsaszín vonalak az elfejlődött csillagokat, a kék kontúrok pedig a FCsO-okat.

### 5.1.2. Az extragalaktikus források eltávolítása

Első lépésben az extragalaktikus forrásokat távolítottam el a már korábban leírt almintából. A *SIMBAD* alapján galaxisként, vagy galaxismagként azonosított összes forrást felhasználtam a tanítóminta elkészítéséhez. A tanítóminta forrásainak eloszlását az 5.3. ábra mutatja. Az ábrán látható, hogy a *SIMBAD* alapján ismert galaxisok eloszlása nem egyenletes, de a legfeltűnőbb, hogy a galaktikus fősík irányában erőteljes hiány mutatkozik. Ennek legvalószínűbb oka, hogy a közeli- és közép-infravörös hullámhosszokon a galaktikus diszk kevésbé átlátszó, és kitakarja a háttérgalaxisokat, illetve az irányából érkező nagy intenzitású infravörös sugárzás és a konfúzió nehézkessé teszi az extragalaxisok detektálását. Ezen kívül a Tejútrendszer fősíkjában, illetve azt az körülvevő régiókban található intersztelláris por a háttérobjektumok színére is hatással van az intersztelláris vörösdésen keresztül.

Mindezeket figyelembe véve az extragalaktikus objektumok kiszűrését három, egymástól független QDA segítségével végeztem. Az extragalaktikus minta objektumainak pozíciójában kiolvastam a Schlegel és mtsai (1998) teljes-égbolt  $E(B-V)$  térkép értékeit. Ezen értékek alapján felosztottam az égboltot kis, közepes és nagy  $E(B-V)$  értékekre úgy, hogy a kis értékeket tartalmazó régiókba essen az ismert extragalaxisok 90%-a, a közepes értékeket tartalmazó területeken legyen az extragalaktikus források 9%-a, és mindössze 1% százalék essen a nagy  $E(B-V)$  értékű területekre. Emellett a szín-szín diagramokon megfigyelt eloszlásuk alapján az extragalaktikus forrásokat két csoportra bontottam. A



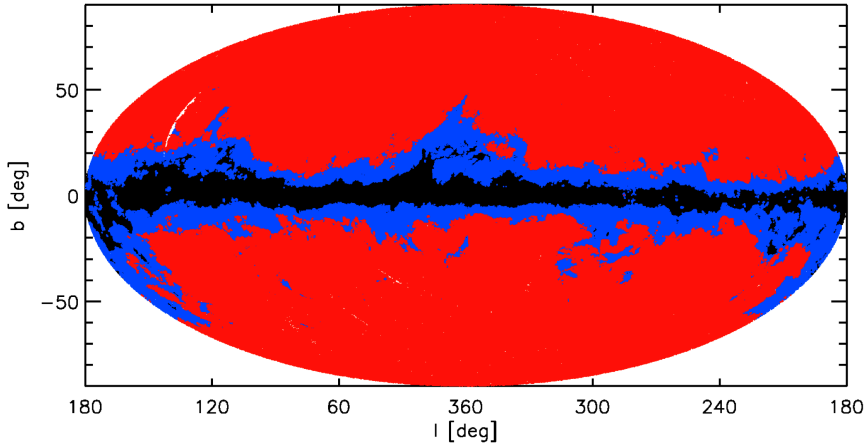
5.3. ábra. A *SIMBAD* segítségével azonosított extragalaktikus források felületi sűrűségének eloszlása galaktikus koordináta-rendszerben, Aitoff vetületben. A logaritmikus színskála  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  felbontás mellett mutatja a felületi sűrűség értékét  $10^{-1}$  és  $10^2$  értékek között.

típusok a két csoportban a következők:

1) G, PoG, GiC, BiC, GiG, GiP, HzG, mAL, rG, H2G, LSB, EmG, SBG, bCG, LeG, LIN, SyG, Sy2, Bla, OVV, AG?

2) ALS, DLA, LLS, BAL, Q?, Bz?, BL?, LeI, LeQ, AGN, Sy1, BLL, QSO

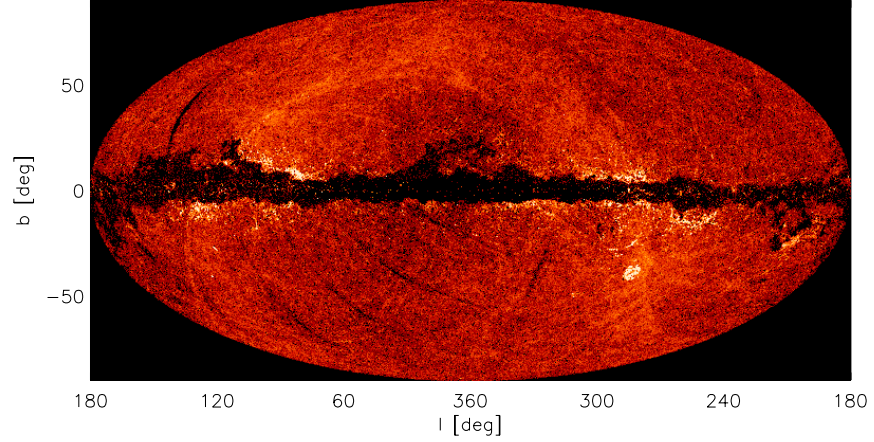
Mivel a Nagy Magellán-felhő objektumai egyszerre extragalaktikusak, de emellett felbonthatóak is, ezért az abban az irányban látható forrásokat kihagytam a tanítómintákból.



5.4. ábra. A *Schlegel és mtsai (1998)*  $E(B-V)$  értékek alapján meghatározott galaktikus területek, melyeken a *QDA*-t külön-külön elvégezve azonosítottam az extragalaktikus objektumokat. A határok az  $E(B-V) = 0,16$  és  $E(B-V) = 0,60$  értékeket jelölik.

Az így létrehozott tanítóminták segítségével 910 972 forrást klasszifikáltam extragalaktikus objektumként. A források felületi sűrűségét az 5.5. ábra mutatja. A klasszi-

fikáció jóságát azzal adom meg, hogy a tanítóminta forrásaiból hány százalékot sikerült a QDA segítségével is extragalaktikusként klasszifikálni. Bemenő adatként 162 404 forrás szerepelt, amelyek közül 160 633 adódott vissza, vagyis a klasszifikáció jósága 98,9%.



5.5. ábra. QDA segítségével extragalaktikus objektumként klasszifikált WISE források felületi sűrűségének eloszlása galaktikus koordinátarendszerben. A logaritmikus színskála  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  felbontás mellett mutatja a felületi sűrűség értékét  $10^{-1}$  és  $10^2$  értékek között.

### 5.1.3. A mezőcsillagok eltávolítása

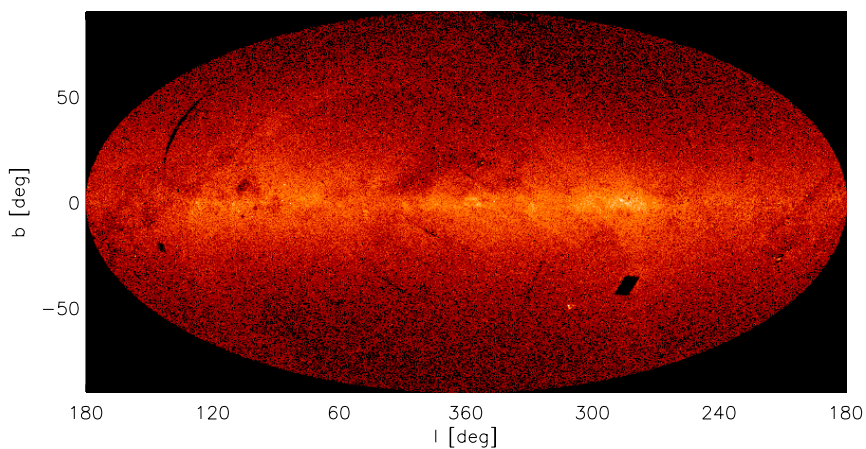
Az extragalaktikus objektumoktól megtisztított mintából a második lépésben a mezőcsillagokat távolítottam el. A tanítómintában a mezőcsillagokat azon források alapján definiáltam, amelyeknek a SIMBAD főtípusa  $^{**}$ , vagyis egyszerűen csillag volt. Ilyen típusú objektumból 723 738 darab volt a mintában. A felületi sűrűség eloszlásuk a 5.6. ábrán látható. Alacsony galaktikus szélességeken ( $|b| < 5^\circ$ ) található ezen források 24,3%-a, közepes galaktikus szélességeken ( $5^\circ < |b| < 30^\circ$ ) 54,3%-uk és 21,3%-uk nagy szélességeken.

A QDA klasszifikáció során 2 163 426 forrás adódott mezőcsillagnak. Ezek felületi sűrűség eloszlása látható a 5.7. ábrán. A források 50%-a esik a  $|b| < 5^\circ$  sávba, 41,6%-a található közepes galaktikus szélességeken és 8,4%-uk nagy szélességeken. A tanítómintából bemenő  $^{**}$  típusú források közül 678 526 darabot klasszifikáltam újra, mint mezőcsillag, vagyis a válogatás jósága 93,75%.

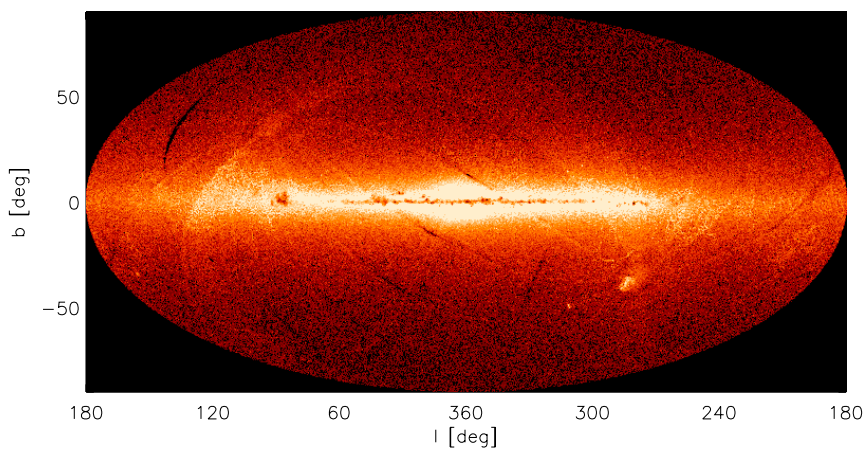
### 5.1.4. A FCsO-ok azonosítása

A harmadik lépésben az extragalaktikus objektumoktól és mezőcsillagoktól megtisztított mintát 3 részre bontottam:

1. Az elfejlődött csillagok



5.6. ábra. A SIMBAD segítségével azonosított mezőcsillagok felületi sűrűségének eloszlása galaktikus koordinátarendszerben. A logaritmikus színskala  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  felbontás mellett mutatja a felületi sűrűség értékét  $10^{-1}$  és  $10^2$  értékek között.



5.7. ábra. QDA segítségével mezőcsillagként klasszifikált WISE források felületi sűrűségének eloszlása galaktikus koordinátarendszerben. A logaritmikus színskala  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  felbontás mellett mutatja a felületi sűrűség értékét  $10^{-1}$  és  $10^2$  értékek között.



- CH\*, HB\*, S\*, RG\*, C\*, s\*y, AB\*, sg\*, Mi\*, pA\* - 5431 db

## 2. A csillagközi anyaghoz kapcsolódó típusok

- BNe, RNe, sh, HVC, ISM, EmO, PN - 1225 db
- PN?, SNR, DNe, Cld, MoC, HII, PoC, glb, CGb, out, SR?, GNe - 770 db
- cor, bub, of? - 131 db

## 3. FCsO típusok

- Y\*O, Y\*?, FU\* - 9488 db
- TT\*, TT?, Or\* - 1616 db
- \*iN, pr\* - 362 db
- VizieR Class I, Class II, Class III - 2754 db

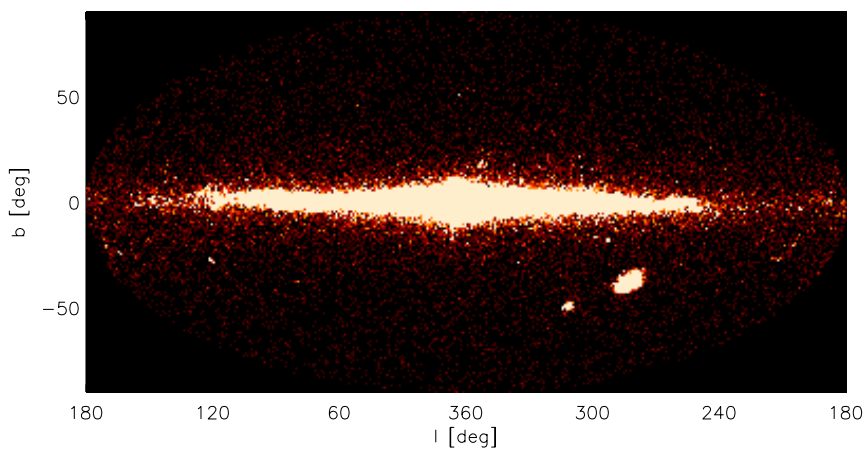
Ahogy látható, a főcsoportokat további alcsoportokra bontottam attól függően, hogy a szín-szín diagramon történt elhelyezkedésük mutatott-e hasonlóságot. Ennek a tanítómintának a segítségével olyan FCsO mintát hoztam létre, amely nagy mértékben tartalmazta az ismert FCsO-okat, de bizonyos csillagtípusokból is jelentős arányú maradt, például az aszimptotikus óriásági jelöltek 76%-a, a szénecsillagok 13%-a, valamint a hosszúperiódusú változócsillagok 59%-a. Emellett kiesett a SIMBAD-ban 'Y\*O'-ként jelölt források 19%-a. Ezért a létrehozott FcsO mintán és a komplementer mintán még egy iterációs lépésként elvégeztem a QDA-t. A végső, 510 002 elfejlődött csillagként klasszifikált forrás felületi sűrűsége a 5.8. ábrán látható. A tanítóminta 84,8%-a (4608 forrás) klasszifikálódott újra, mint elfejlődött csillag.

A CsKA-gal kapcsolatba hozható források mintája 41 316 forrásból áll, ennek a tanítóminta alapján számított jósága 42,1% (894 objektum). Ezek felületi sűrűségét az 5.9. ábra mutatja.

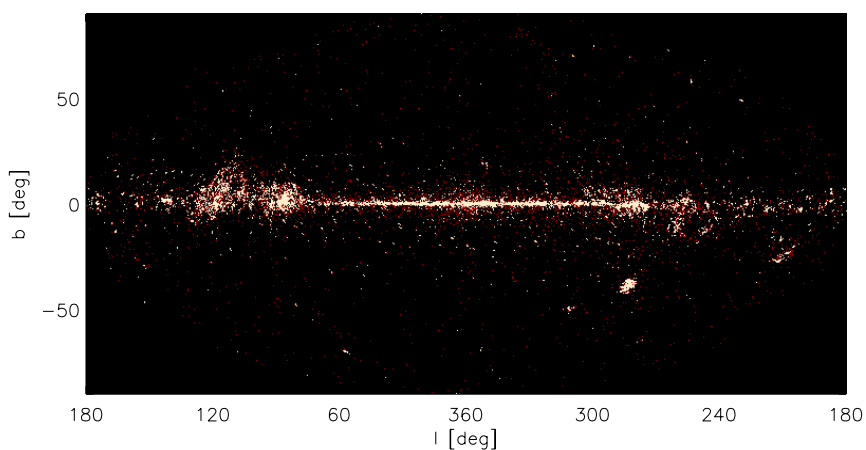
## 5.2. Eredmények

### 5.2.1. A FCsO minta jellemzői

A végső, 2 535 438 FCsO jelölből álló minta a fent leírt módon állt elő. A források felületi sűrűségének galaktikus eloszlását az 5.10. ábra mutatja. A jelöltek 79,4%-a (2 012 346 forrás) található  $|b| < 5^\circ$  alatt. Közepes galaktikus szélességeken 18,7% (474 685 forrás) helyezkedik el, 1,9%-uk (46 752 forrás) pedig nagy galaktikus szélességeken.

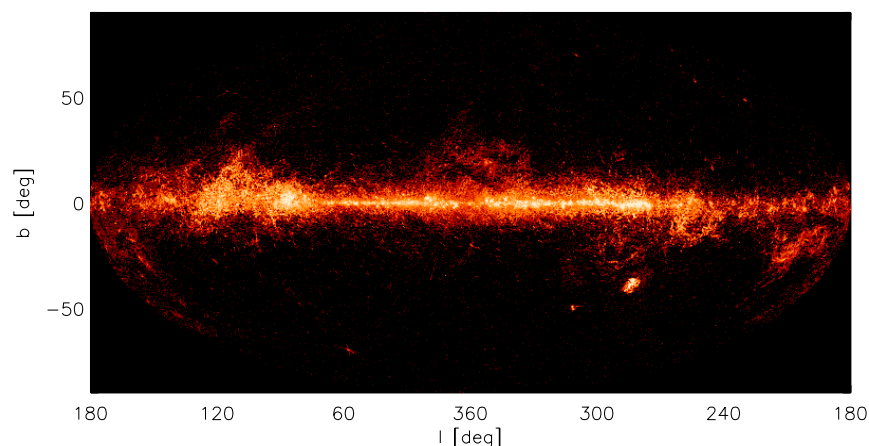


5.8. ábra. QDA segítségével elfejlődött csillagként klasszifikált WISE források felületi sűrűségének eloszlása galaktikus koordinátarendszerben. A lineáris színskala  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  felbontás mellett mutatja a felületi sűrűség értékét 0 és 3 között.



5.9. ábra. QDA segítségével csillagközi anyaghoz kapcsolódó objektumként klasszifikált WISE források felületi sűrűségének eloszlása galaktikus koordinátarendszerben. A lineáris színskala  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  felbontás mellett mutatja a felületi sűrűség értékét 0 és 2 között.





5.10. ábra. QDA segítségével FCsO jelöltként klasszifikált WISE források felületi sűrűségének eloszlása galaktikus koordinátarendszerben. A logaritmikus színskala  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  felbontás mellett mutatja a felületi sűrűség értékét  $10^{-1}$  és  $10^3$  értékek között.

### 5.2.2. A minta szennyezettsége

A tanítóminta 16 547 forrásából 12 179 darabot klasszifikáltam újra FCsO-oként, tehát a válogatás jósága a FCsO-okra nézve 73,6%. Megvizsgáltam a mintában található egyéb típusú ismert forrásokokból álló szennyezettség mértékét is. Összesen 34 513 olyan forrást találtam a FCsO jelöltek mintájában, amely a SIMBAD alapján nem valamilyen fiatal, fősorozat előtti fejlődési állapotú csillagra utal. Ez az ismert típusú objektumoknak mindössze 3,4%-a. Ezek között is nagy számmal szerepelnek azonban olyan típusok, amelyek nem speciális típusok, csak általános besorolások. Ezek alapján a mintát szennyező objektumokat 4 fő típusra bontottam, azokon belül pedig altípusokra:

1. Egyértelmű szennyeződés
  - Extragalaktikus forrás - 1251 db
  - Elfejlődött csillag - 486 db
  - Egyéb - 1864 db
2. Lehetséges szennyeződés - valamilyen típusú "jelölt" - 5096 db
3. Lehetséges FCsO
  - Egyszerű csillag - 15 270 db
  - Csillagok asszociációkban, halmazokban, emissziós vonallal rendelkezők - 5788 db
  - Infravörös forrás - 3853 db

- Csillagközi anyaghoz kapcsolódó források - 1931 db
- Változócsillag - 459 db
- Nagy sajátmozgással rendelkező csillag - 250 db
- Flare csillag - 123 db

#### 4. Valószínűleg részben FCsO

- Rádióforrás, vagy röntgenforrás - 1866 db

Látható tehát, hogy a valószínű szennyeződés a mintában igen alacsony, mindössze 8697 forrás, vagyis 0,8%, míg az egyértelmű szennyeződés csupán 3601 forrás, tehát 0,33%!

A FCsO-oként klasszifikált források mintájának szennyezettségét a Sloan Digital Sky Survey Fotometriai Katalógusa (Adelman-McCarthy és mtsai, 2012) segítségével is ellenőriztem. Az SDSS katalógus objektumaihoz tartozik egy klasszifikáció is, ami megadja, hogy egy adott forrás galaxis vagy csillag. Ezek alapján az SDSS-ben is szereplő ismert SIMBAD FCsO-ok 15,37%-a inkább galaxis, mint csillag. A QDA segítségével válogatott FCsO mintában az SDSS galaxisok aránya 6,79%, tehát kijelenthető, hogy a minta biztosan nem rendelkezik nagyobb galaxis-szennyezettséggel, mint az ismert FCsO-ok mintája.

### 5.2.3. Klasszifikáció fejlődési állapotok szerint

A SVM segítségével fejlődési állapotok szerint is klasszifikáltam a FCsO jelölteket. A tanítóminta létrehozásához a Vizier katalógusban fellelhető ismert FCsO-okat tartalmazó, publikált katalógusok közül a következőket használtam: Billot és mtsai (2010), Oliveira & Casali (2008), Gutermuth és mtsai (2008), Gutermuth és mtsai (2009), Hernandez és mtsai (2007a), Hernandez és mtsai (2007b), Kirk és mtsai (2009), Koenig és mtsai (2008), Liu és mtsai (2011), Mookerjee és mtsai (2009), Morales-Calderon és mtsai (2009), Peterson és mtsai (2011), Pillitteri és mtsai (2010), Povich és mtsai (2011), Prisinzano és mtsai (2008), Rebull és mtsai (2011) és Winston és mtsai (2010).

A katalógusok alapján a tanítóminta 480 darab Class I, 2270 darab Class II és 1572 darab Class III forrást tartalmazott. Korábban (ld. 5.1.2. fejezet) már szót ejtettem az intersztelláris vörösdésről, ami jelentősen befolyásolhatja a csillagok fényességét a rövidebbtől a hosszabb hullámhosszak felé haladva. Ennek a hatásnak a csillapítására az extragalaktikus objektumok eltávolításánál alkalmazott módszert használtam, vagyis a válogatást különböző  $E(B-V)$  értékkel rendelkező területeken külön-külön végeztem el. Az  $E(B-V)$  határok kiválasztásánál a tanítóminta objektumai irányában látható, Schlegel és mtsai (1998) térképekről leolvasott értékeket használtam, és a Class I, II,

III objektumok esetében megfigyelt  $E(B-V)$  eloszlást vettem alapul. A magas értékeket tartalmazó területet  $E(B-V) = 4,48$  felett definiáltam. Ez az érték a Class I típusú objektumok irányában látszó értékek mediánja. Az alacsony értékeket a Class III típus irányában látható értékek mediánja definiálta, vagyis  $E(B-V) = 1,87$ .

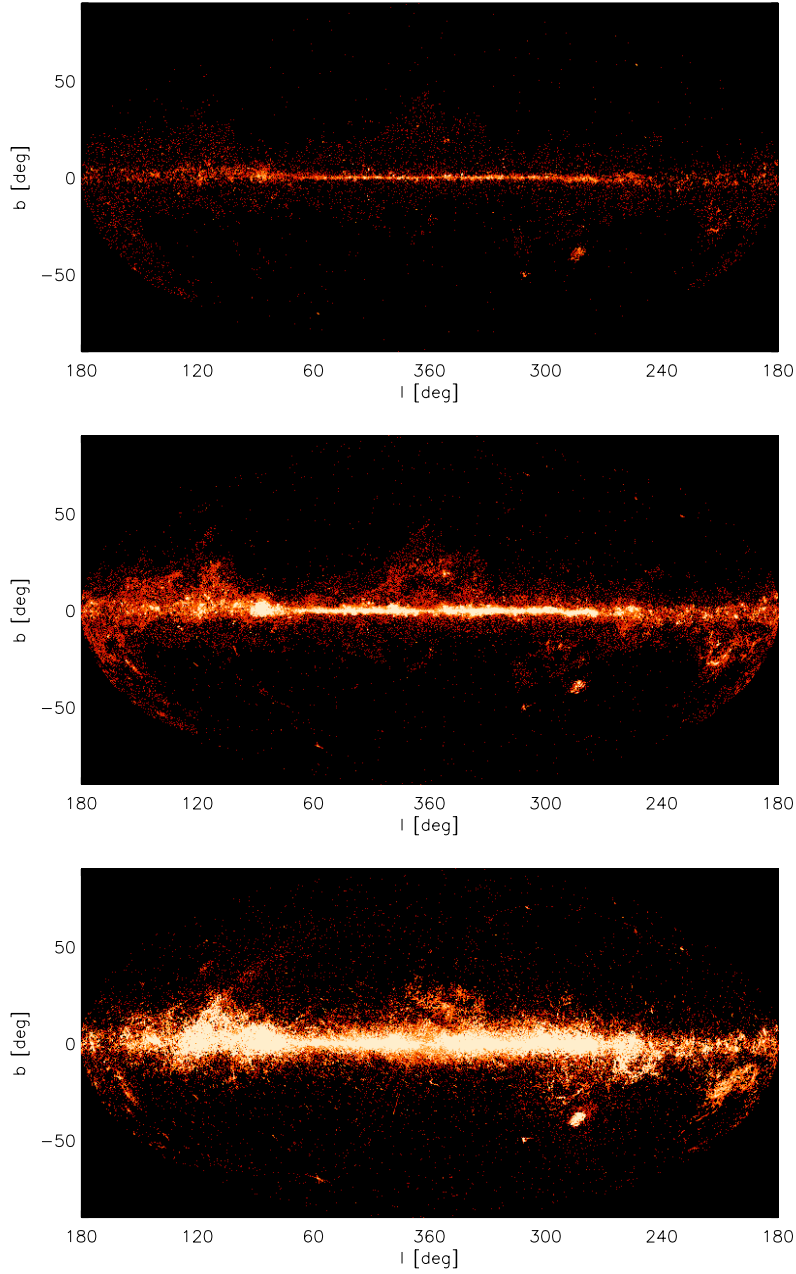
A klasszifikáció eredményeként 34 106 darab Class I, 439 464 darab Class II és 2 060 213 darab Class III forrást azonosítottam. Az egyes típusok felületi sűrűség eloszlását galaktikus koordinátarendszerben az 5.12. ábra mutatja. A klasszifikáció jóságát ismételtén a tanítómintából azonos típusként klasszifikáltak arányával jellemeztem. Class I típusok esetén a 480 bementi forrásból 298-at klasszifikáltam újra mint Class I forrást, ami 62,1%-os jóságot jelent. Class II források esetén a bemenő 2270 objektumból 2129 darabot sikerült újraklasszifikálnom, ami 93,8%-os eredményességet jelent. A bemeneti 1572 db Class III forrásból 1431 forrást klasszifikáltam újra ugyanazzal a típussal, vagyis 91%-os sikerrel.

Ahogy a teljes FCsO minta esetében, úgy a fejlődési állapot szerint klasszifikált források esetében is elvégeztem a szennyezettség becslését az SDSS alapján. A Vizier-ben szereplő Class I források 36,96%-a rendelkezik galaxis besorolással. A SVM segítségével Class I-ként klasszifikált források között ez az arány 24,27%. A Class II források esetében a Vizier-források 10,83%-át találtam galaxisnak, a SVM Class II forrásoknak pedig 13,21%-át. A Class II források esetében az ismertek 10,53%-a volt galaxis az SDSS alapján, míg a SVM-nal klasszifikált forrásoknak 6%-a.

### 5.3. Összehasonlítás korábbi eredményekkel

A WISE pontforrások klasszifikációját és a FCsO tartalmát részletesen tanulmányozta Koenig és mtsai (2012), akik a Gutermuth és mtsai (2008, 2009) klasszifikációt adaptálták a WISE áteresztési sávoknak megfelelően. A többlépéses folyamat során szín-szín és szín-fényesség diagramok alapján határoztak meg olyan határszíneket és határfényességeket, ami alapján eltávolították a szennyeződésnek vélt forrásokat. Annak érdekében, hogy a saját eredményeimmel összehasonlíthassam az ő válogatásukat, az általuk felállított kritériumokat ugyanarra a kiinduló WISE almintára alkalmaztam.

Első lépésként az extragalaxisok eltávolítását végeztem el. Az eredményként kapott 796 779 forrás között a SIMBAD-ban ismert galaxisoknak mindössze 53,9%-át találtam meg. A második lépésben az AGN típusú objektumokat távolítottam el, az így kapott 750 244 forrásból álló minta a SIMBAD-ban fellelhető extragalaktikus forrásoknak mindössze 5,1%-át tartalmazza. Összegezve, a Koenig és mtsai által extragalaktikus objektumok eltávolítására felírt kritériumok mindössze az ilyen típusú, SIMBAD alapján ismert objektumok 59%-át távolította el, szemben a QDA segítségével eltávolított 98,9%-kal.



5.11. ábra. SVM segítségével *Class I* (felül), *Class II* (középen) és *Class III* (alul) típusú FCsO jelöltként klasszifikált WISE források felületi sűrűségének eloszlása galaktikus koordinátarendszerben. A logaritmikus színskála  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  felbontás mellett mutatja a felületi sűrűség értékét  $10^{-1}$  és  $10^2$  értékek között.

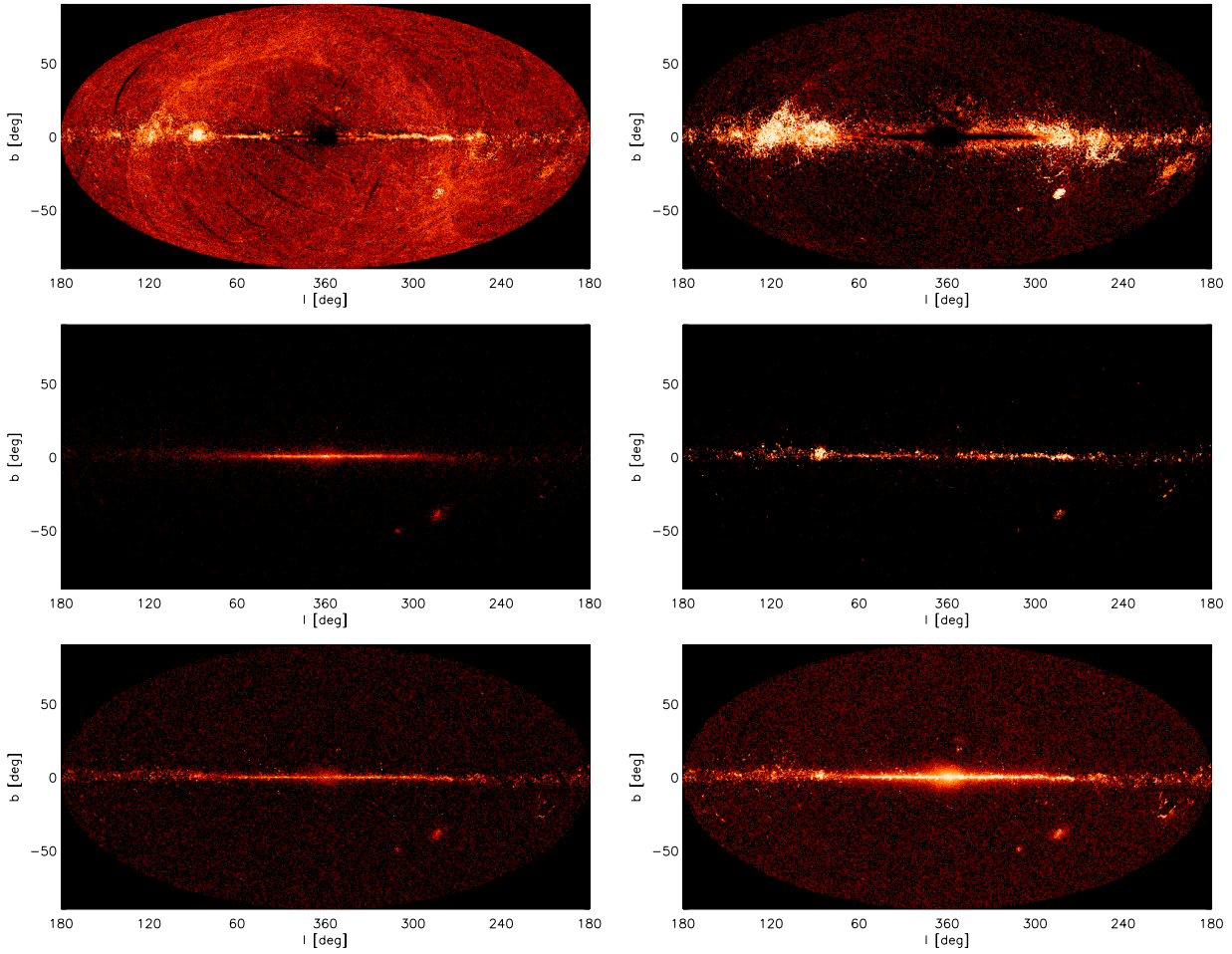
A harmadik lépés olyan detektálások eltávolítására szolgál, amelyek emissziója ütközésnek köszönhető, például FCsO-okból eredő kifúvások és a CsKA találkozása. 23 160 ilyen objektumot találtam a mintában, amelyek közé esik az ismert FCsO-ok 5%-a, a SIMBAD-ban CsKA-ként azonosított objektumok közül pedig 3,2%-ot tartalmaz. Az utolsó szennyező típus, amelyet a kritériumok alapján azonosítottam a mintában, a PAH (policiklusos aromás szénhidrogén) objektumok. Ezekből 73 270 darabot tartalmazott a minta.

A fennmaradó objektumok közül Koenig és mtsai kritériumai a Class I és Class II típusú FCsO-okat azonosítja. Alkalmazva a kritériumokat azt találtam, hogy 72 278 darab Class I és 314 613 darab Class II forrás van a mintában. Ezek a források tartalmazzák a SIMBAD alapján ismert FCsO-ok 69,62%-át, vagyis a QDA esetében megállapított 73,5%-ánál kisebb mértékben ismerte fel a FCsO-okat. A szennyezettség mértékét illetően Koenig és mtsai módszere alapján az ismert extragalaktikus források 20,2%-a maradt a Class I+II mintában, míg a QDA segítségével ez az arány 0,77%! Ezek alapján tehát kijelenthető, hogy a QDA válogatás nagyobb százalékban ismeri fel a FCsO-okat, és a mintába is jelentősen kisebb szennyezettséget visz, mint az egyszerű szín-szín és szín-fényesség diagramok alapján véghezvitt klasszifikáció.

## 5.4. FCsO-ok a Lynds 1188 sötét felhőben

Az LDN 1188 (Lynds, 1962) egy sötét csillagközi felhőkből álló komplexum a Cepheus régióban, az S140/L1204 jelű csillagkeletkeztető molekulafelhő közelében, amely része a Cep OB2 asszociáció (Kun és mtsai, 1987, Ábrahám és mtsai, 2000) körül található óriási gyűrűnek. IRAS 100  $\mu m$ -es mérésekből számított optikai mélység alapján a felhő becsült távolsága 910 pc (Ábrahám és mtsai, 1995), a teljes tömege  $\sim 1800 M_{\odot}$ . A felhőben végbemenő csillagkeletkezéssel több cikk is foglalkozott már. Könyves és mtsai (2004) három FCsO-t vizsgált 2MASS, MSX, IRAS és ISO adatok segítségével előállított spektrális energiaszlásuk alapján. Ábrahám és mtsai (1995)  $H\alpha$  emisszió alapján a felhőben elhelyezkedő 25 infravörös IRAS forrásból 6 forrást találtak FCsO-nak. A közelmúltban Verebélyi és mtsai (2013) összegezték az LDN 1188-cal kapcsolatos molekulavonalas ( $NH_3$  és CS), valamint szub-milliméteres (1,2 mm-es kontinuum) méréseik eredményét. Azt találták, hogy a felhő különböző részei különböző fejlődési stádiumban vannak.

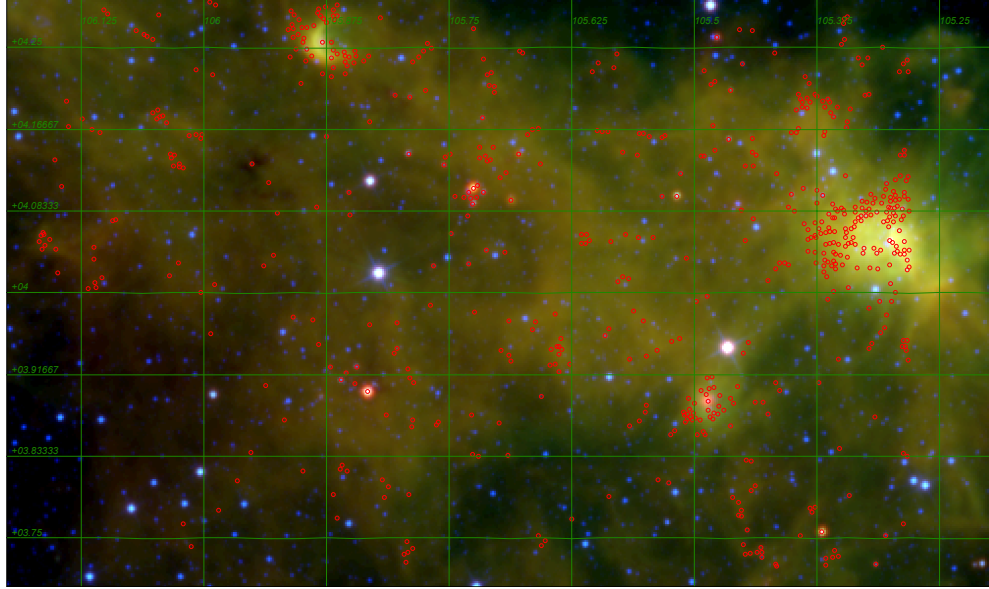
Ebben a fejezetben a WISE alapján QDA-val kiválasztott FCsO-ok segítségével mutatom be az LDN 1188 FCsO tartalmát, leírom a fiatal populációkat és összehasonlítom eloszlásukat a molekuláris anyag eloszlásával.



5.12. ábra. A Koenig et al. (2012) klasszifikációs kritériumok alapján adódó objektumtípusok felületi sűrűség eloszlása galaktikus koordináta-rendszerben. A logaritmikus színskála  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  felbontás mellett mutatja a felületi sűrűség értékét  $10^{-1}$  és  $10^2$  értékek között. Az egyes ábrák a következő típusokat mutatják: extragalaxisok (bal felső), AGN-ek (jobb felső), ütközéssel rendelkező objektumok (bal középső), PAH objektumok (jobb középső), Class I FCSO-k (bal alsó) és Class II FCSO-k (jobb alsó).

### 5.4.1. A FCsO jelöltek

A vizsgált régióban ( $105,2 < l < 106,2$  és  $3,7 < b < 4,3$ , 5.13. ábra) 601 darab FCsO jelet azonosítottam. A SIMBAD-dal történt pozíciókorreláció alapján szinte mindegyik forrás típusa ismeretlen. A korábban már használt  $5''$  sugarú keresősugárral a következő forrásokat sikerült azonosítanom: A [ADM95] 1 (IRAS 22129+6110,  $l=105,29$ ,  $b=+04,05$ ) jelű forrás a DG 180 reflexiós köd belsejében található, és az "A" jelű (Ábrahám és mtsai, 1995) CO maghoz közel található. Az IRAS 22143+6120 ( $l=105,52$ ,  $b=+04,1$ ) és 2MASS J22174025+6147025 ( $l=105,79$ ,  $b=+04,14$ ) jelű források egyszerű csillagként ismertek. A CDS 1319 ( $l=105,49$ ,  $b=+03,89$ ) egy emissziós csillag a GN 22.15.0 reflexiós köd közelében. Az IRAS 22174+6121 (IRS-6,  $l=105,83$ ,  $b=+04,90$ , lásd 5.15. ábra) IR típusú objektumként jelenik meg a SIMBAD-ban, az utolsó forrás ( $l=105,29$ ,  $b=+04,05$ ) pedig a GN 22.12.9 jelű reflexiós köd belsejében található.



5.13. ábra. Az LDN 1188 felhő hamisszínes RGB képe. A vörös, a zöld és a kék színek a WISE 4,6, 12 and 22  $\mu\text{m}$ -en készült felvételeinek felelnek meg. A kiválasztott FCsO jelölteket a piros körök ábrázolják. A zöld koordináta-rácsok a galaktikus koordináta-rendszert mutatják.

### 5.4.2. A FCsO jelöltek osztályozása

A FCsO jelöltek fejlődési állapotát a spektrálindeks ( $\alpha$ ) alapján becsültem. Ez a becslés korábban történt, mint az előzőekben bemutatott fejlődési osztályok szerinti SVM válogatás, ezért a Majaess (2012) által publikált módszert alkalmaztam. Mivel a FCsO-ok várható hőmérséklete alacsony, ezért a számítás előtt színkorrekciót nem alkalmaztam. A számításhoz használt képlet a következő:  $\alpha \approx 0,36(W_1 - W_2) + 0,58(W_2 - W_3) + 0,41(W_3 -$

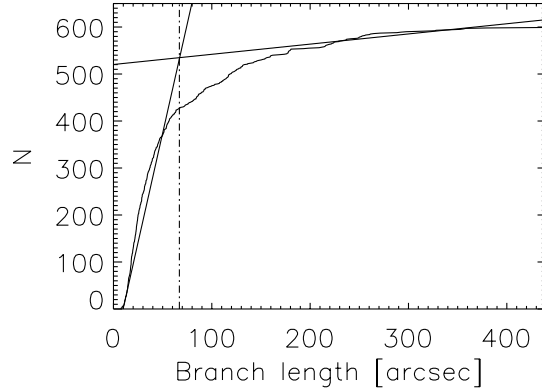
$W_4) - 2,90$ . Ahogy korábban is, a  $W1...W4$  az egyes WISE áteresztési sávokban mért magnitúdó értékét jelentik.

Az  $\alpha$  alapján becsült fejlődési állapotra általánosan elfogadott kritériumok a következők: Class I:  $\alpha > 0,3$ , Flat:  $-0,3 < \alpha < 0,3$ , Class II:  $-1,6 < \alpha < -0,3$  és Class III:  $\alpha < -1,6$ . Ezeket a kritériumokat alkalmazva 50 forrást találtam Class II, 180 forrást Flat és 371 forrást Class I típusúnak. A becslés alapján nincs Class III objektum a vizsgált területen. A források osztályok szerinti eloszlását az 5.16. ábra mutatja.

### 5.4.3. Csoportok azonosítása

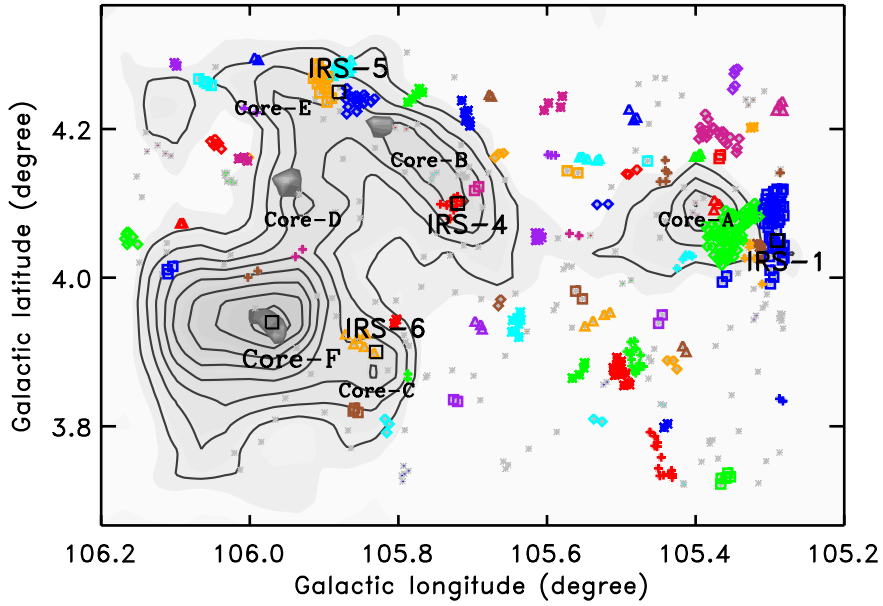
A csoportok azonosításához a minimális feszítőfa (Minimum Spanning Tree, továbbiakban MST) módszert (Cartwright & Whitworth, 2004) alkalmaztam, követve Guter-muth és mtsai (2009), valamint Beerer és mtsai (2010) leírását. A feszítőfa létrehozását Gower & Ross (1969) részletesen is leírja. A MST-n belül csoportokat azonosíthatunk, amelyeken belül az ághossz rövidebb, mint az ún. levágási hossz. A levágási hossz megá-lapításához az ághosszak kumulatív eloszlását (ld. 5.14. ábra) két szakaszra bontottam. A meredeken emelkedő és az enyhén emelkedő szakaszokra egy-egy egyenest illesztettem. Ezeknek az egyeneseknek a metszéspontja adta meg a 67'' nagyságú levágási hosszt, amelyet az egyes csoportok azonosítására használtam.

A vizsgált területen összesen 91 FCsO csoportot találtam, melyeket az 5.15. ábra mutat. A 601 forrásból 509 (85%) da-rab tagja valamilyen csoportnak. A nagy, vagyis 4 és annál több elemű csoportok száma 37. Ezek listája és tulajdonságai a 5.1. táblázatban láthatók. Ahogy a tá-b-lázat is mutatja, a csoporttagok túlnyo-mó többsége Class I és Flat típusú ob-jektum. A 371 Class I típusból 262 da-rab (71%) helyezkedik el valamilyik nagy csoportban. 68 darab (18%) található ki-sebb csoportokban, és mindössze 41 Class I forrás (18%) nincs csoporthoz kötve. A Flat típusú objektumok 54%-a (98 db) ta-lálható a nagy csoportokon belül, 27%-uk (48 db) kisebb csoportokban és 19%-uk (34 db) csoporton kívül. A Class II objektumoknak szintén 54%-a (27 db) helyezkedik el a nagyobb csoportokban, 14% (7 db) kisebb csoportokban és 32% (16 db) csoportokon kívül.



5.14. ábra. A MST ághosszak kumulatív eloszlása (görbe fekete vonal). Az eloszlás me-redeken és enyhén emelkedő részeit egyene-sekkel illesztettem (egyenes fekete vonal). A metszéspontjuk adja meg a levágási hosszt (szaggatott vonal).





5.15. ábra. MST-vel azonosított FCsO csoportok az LDN 1188 területén. Minden csoportot külön szimbólum-szín kombináció mutat. Azok a források, melyek nem köthetők egy csoporthoz sem, szürke szimbólummal láthatók. A források háttérében az Ábrahám és mtsai (1995) CO mérések (kontúrvonalak), illetve a Verebélyi és mtsai (2013)  $\text{NH}_3$  mérések (szürkeárnyalat) láthatók.

Ezek alapján kijelenthető, hogy a legfiatalabb, Class I típusú FCsO-ok inkább nagyobb csoportokat formálnak. A hozzájuk képest már elfejlődött Flat és Class II objektumok szintén megtalálhatók nagyobb csoportokban, de a kapcsolatuk a nagyobb csoportokkal egyre inkább csökken. A Class I, Flat és Class II evolúciós időskálán is megfigyelhető a csoportoktól való eltávolodás, hiszen a csoporton kívüliség aránya 11, 19 és 32%-ra nő.

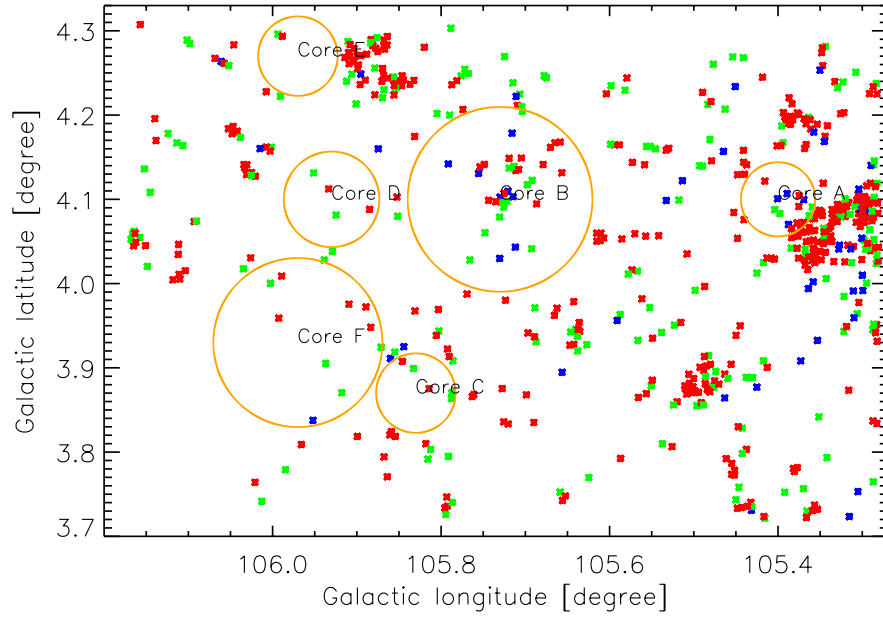
#### 5.4.4. A FCsO-ok eloszlásának összevetése a CO felhőmagokkal

Ábrahám és mtsai (1995) CO csomókat azonosítottak az LDN 1188 sötét felhőben, amelyeknek meghatározták a méretét is. Ezt a látszólagos méretet használtam ahhoz, hogy megállapítsam a FCsO-ról, hogy melyik CO csomóhoz tartoznak. Amennyiben a forrás a CO csomó sugarának másfélszeresénél nagyobb távolságban volt, úgy azt az objektumot nem tekintettem a CO-val asszociálnak. A csomók tulajdonságait és a környezetükben található FCsO-ok eloszlását, tulajdonságait összevettem. Az eredményeket és a CO csomók alapvető tulajdonságait a 5.2. táblázatban foglaltam össze. A CO csomók kiterjedését és a környezetükben található FCsO jelöltek becsült fejlődési állapotát az 5.16. ábra szemlélteti.

"A" csomó: Ez a legnagyobb oszlopsűrűséggel és FCsO/ $M_\odot$  aránnyal rendelkező CO

5.1. táblázat. *A négy, vagy annál több tagú csoportok tulajdonságai. Az oszlopok jelentése a következő: 1) A csoport azonosítója, 2-3) a csoport tömegközéppontjának galaktikus koordinátái, 4-5-6) a Class I, Flat, Class II típusú objektumok száma a csoporton belül.*

ID	l	b	Class I	Flat	Class II
1	105,45012	3,7782540	9	3	1
3	105,44245	3,8283770	2	2	0
8	105,50598	3,8776820	10	5	0
9	105,55706	3,9274430	14	2	0
12	105,55048	3,9040500	2	2	0
16	105,61503	3,9005360	3	1	0
19	105,58165	4,1385340	2	3	0
23	105,78979	4,2000680	2	2	0
29	105,40819	4,0657340	5	1	0
30	105,57775	4,0113840	5	0	0
32	105,35107	4,0568050	60	12	1
34	105,32864	4,0804650	32	12	8
35	105,32179	4,0612100	1	2	2
36	105,35825	4,0890170	2	0	3
37	105,35757	4,1067460	2	1	1
39	105,32298	4,0994040	18	2	2
42	105,39787	3,9452450	4	2	0
43	105,37060	4,0606210	3	2	0
46	105,34638	4,1294340	3	1	1
47	105,36664	4,1650330	3	1	0
48	105,36978	3,9314960	4	1	0
51	105,53272	3,9368650	5	4	0
56	105,67760	4,1627060	4	2	0
57	105,72053	4,1784420	3	4	3
58	105,54562	4,1308120	1	4	1
60	105,70778	4,1616880	3	1	0
66	105,78670	3,8376040	3	2	0
68	105,86796	4,1670290	1	3	2
72	105,57941	4,0978430	2	3	0
74	105,83225	4,0858290	13	4	0
75	105,90989	4,2595540	10	2	0
76	105,90340	4,2405880	13	2	1
80	105,87865	4,2042930	6	1	0
81	106,04801	4,1799080	5	1	0
83	105,87592	4,2697040	2	1	1
87	106,02504	4,2555210	1	3	0
88	106,02050	4,1274220	4	4	0



5.16. ábra. FCSO jelöltek és molekuláris felhőmagok az LDN 1188-ban. A FCSO-ok Class I, Flat és Class II fejlődési állapotait a piros, zöld és kék szimbólumok jelzik. A  $^{13}\text{CO}$  csomókat (Ábrahám és mtsai, 1995) narancssárga körök mutatják.

csomó, annak ellenére, hogy a tömege viszonylag alacsony ( $130 M_{\odot}$ ). Az  $\alpha$  spektrálinde克斯 átlagos értékét itt találtam a legmagasabbnak, ami arra utal, hogy nagyon fiatal csillagok helyezkednek el a CO csomó közelében. A két legnagyobb elemszámú FCSO csoport is itt található, 73 és 52 csoporttaggal. Az IRS-1 (IRAS 22129+6110) jelű forrás szintén az "A" csomó közelében található.

"B" csomó: A vizsgált területen ez a CO csomó rendelkezik a legkisebb oszlopsűrűséggel. A FCSO objektumok száma itt a legmagasabb. Az átlagos  $\alpha$  érték a Flat típushoz közeli, ami arra utalhat, hogy a források már elfejlődöttebbek. Csak kisebb csoportokat sikerült azonosítani a mag közelében. Az IRS-4 jelű forrás is a mag irányában látható.

"C" csomó: A CO csomó FCSO tartalma hasonló ahhoz, amit a "B" csomó esetében figyeltem meg. Az átlagos  $\alpha$  érték a Flat típussal megegyező. Az oszlopsűrűség nagyobb, mint az előző esetben, de az egy naptömegre eső FCSO-ok száma alacsonyabb. Csak kisebb csoportosulások figyelhetők meg a csomó közelében, amely látszólagosan az IRS-6 jelű forrással is asszociált.

"D" csomó: Itt található a legkevesebb FCSO, és az  $\alpha$  átlagos értéke is itt a legmagasabb, ami arra utal, hogy a csillagkeletkezés már nagyrészt végbement. Ezen kívül az itt megfigyelt FCSO-ok közül egy sem tagja 4 vagy annál több tagú csoportnak, valamint az egy naptömegre eső FCSO szám is nagyon alacsony.

"E" csomó: A csomó közelében több olyan FCSO csoport is található, melyeknek

a tagszáma nagyobb, mint 10. A becsült  $\alpha$  érték alapján a források többsége Class I típushoz tartozik, és ezt a populációt találtam a második legfiatalabbnak a területen. Habár az IRS-5 jelű infravörös forrás is ebben az irányban látható, a szub-milliméteres mérések nem detektáltak forrást (Verebélyi és mtsai, 2013).

"F" csomó: A legnagyobb tömegű csomó a régióban, a második legnagyobb oszlop-sűrűséggel, és ez tartalmazza a legkevesebb egy naptömegre eső FCsO-ot. Verebélyi és mtsai (2013) eredményével összhangban, valószínűleg a csomó a csillagkeletkezés nagyon korai fázisában van.

Az IRAS 22150+6109 (l=105,49, b=3,89) jelű forrás irányában szintén többlet figyelhető meg a FCsO-ok számában. A forrás az emissziós vonalakat mutató 3+60 9 OB csillaggal (Wackerling 1970) asszociált.

5.2. táblázat. *CO felhőcsomók általános jellemzői és a becsült csillagkeletkezési aktivitásuk. Az oszlopok jelentése a következő: 1) a CO csomó azonosítója, 2-3) galaktikus koordináták, 4) az asszociált FCsO-ok  $\alpha$  medián értéke, 5) az átlag körüli szórás, 6) az asszociált FCsO-ok száma, 7) az egy naptömegre jutó FCsO-ok száma, valamint 8) a csomókban található  $H_2$  részecske számsűrűség.*

Clump	Position l° b°	$\alpha_{med}$	$\sigma_\alpha$	$N_{YSO}$	$N_{YSO}/M_{cloud}$ $M_\odot^{-1}$	$n(H_2)$ $cm^{-3}$
A	105,40 4,10	0,83	0,72	47	0,36	1770
B	105,73 4,10	0,31	0,64	66	0,25	600
C	105,83 3,87	0,30	0,66	19	0,12	930
D	105,93 4,10	-0,13	0,48	9	0,05	1120
E	105,97 4,27	0,54	0,71	15	0,17	1040
F	105,97 3,93	0,43	0,43	12	0,012	1140

## 5.5. Indukált csillagkeletkezés a Rozetta molekulafelhőben

A Rozetta molekulafelhő (RMC) egy nagyon széleskörűen tanulmányozott terület. Gyakran említik az indukált csillagkeletkezés egyik példajaként. A felhőben egy OB csillagpopuláció található, amely megvilágítja a belsejében található NGC 2244 jelű ködöt, és kölcsönhat a környező CsKA-gal. Román-Zúñiga & Lada (2008) részletes leírást ad a a felhőkomplexumról, amelyet korábban a rádiótól a röntgen hullámhosszakig sok tartományban vizsgáltak már. A RMC-ban található, korábban ismert FCsO-ok szekvenciális eloszlása arra utalt, hogy a csillagkeletkezés először a központi NGC 2244-ben indult be, és radiálisan távolodva újabb és újabb csillagok alakultak ki (Williams és mtsai 1995; Román-Zúñiga és mtsai 2008). A CsKA eloszlását is figyelembe véve azonban ez az állítás vitatható, hiszen az OB csillag ionizációs frontján kívül is vannak csillagcsoportok, ame-

lyek túl messzire helyezkednek el az OB csillagtól ahhoz, hogy indukált csillagkeletkezés eredményeképpen jöhettek volna létre.

Az általam ebben a fejezetben bemutatott, WISE mérések alapján előállított FCsO jelölt minta segítségével vizsgáltuk a RMC-ban az indukált csillagkeletkezést. Mivel az eredmények nem saját kutatásaim, ezért azokat csak röviden mutatom be. A válogatásom alapján 535 FCsO-ot találtunk a vizsgált területen, amelyek spektrálindeket a következő formulával adtuk meg:  $\alpha = d\log(\lambda F_\lambda)/d\log d$  (Greene és mtsai 1994). Ez alapján, ahogy az LDN 1188 esetében is, megbecsülhető a források fejlődési állapota. Az extinkció alapján azonosított 13 csoportban elhelyezkedő források segítségével így már megbecsülhető az egyes halmazok kora is.

A legidősebb halmaz az NGC 2244, a központi O csillagok becsült 2 millió éves korával egyidős. A halmazok kora úgy tűnik, hogy az NGC 2244-től mért távolságukkal csökken. Ez igaz az NGC 2237, PL 01 és PL 02 halmazokra, ami arra utal, hogy valóban indukált a csillagkeletkezés folyamata. A PL 03 halmaz már az NGC 2244 hatásának kitett területen kívül esik, kora mégis nagyjából megegyezik a PL 02 halmazéval, a PL 05 pedig még kb.  $6,1 \times 10^5$  évvel idősebb. Távolabb haladva a PL 06 és PL 07 még egymillió évvel idősebb, vagyis a koruk nagyjából megegyezik az NGC 2244-gyel. A még távolabbi REFL 09, CMFT 10 és CMFT 11 hasonló fejlődési állapotban vannak, mint a PL 04, pedig határozottan kívül esnek az O populáció hatósugarán. Ezek alapján kijelenthető, hogy a RMC-ban az NGC 2244 indukálta néhány halmaz kialakulását, de nem mindegyikét.



## 6. fejezet

# A boloSource algoritmus

A galaktikus határfelületek feltérképezésében, azonosításában a jelenkor és a jövő elsődleges eszköze a Herschel Űrobszervatórium, amely 2009. június 14-én készítette az első felvételeket, és egészen 2013. április 29-ig végzett fotometriai és spektroszkópai méréseket. Sajnos a közeljövőben nem lesz olyan űreszköz, amely hasonló teljesítményre lenne képes. A Herschel PACS (Poglitsch és mtsai, 2010) és SPIRE (Griffin és mtsai, 2010) műszerei összesen 6 különböző távoli infravörös hullámhosszon végeztek fotometriai méréseket. A PACS kék detektora 70 vagy 100  $\mu m$ -en mért, miközben a vörös detektor 160  $\mu m$ -en (tehát a 3 hullámhossz egyidejű mérése nem volt lehetséges). A SPIRE egyidejűleg mért 250, 350 és 500  $\mu m$ -es hullámhosszon. A Herschel a mérési idejében garantált kulcsprogramok (GTKP) és "open-time" kulcsprogramok (OTKP) különböző tudományos témákhoz tartozó célpontjait mérte. A csillagkeletkezéshez és csillagközi anyaghoz kapcsolódó GTKP mérési idő összesen 2337,5 óra volt, míg az OTKP esetében 2113,2 óra, ami összesen közel 185 és fél napnak megfelelő időmennyiség. Ezek a mérések lefedték a fontosabb csillagkeletkezési területeket, valamint a galaktikus fősíkot. A mérések feldolgozása azonban szinte még csak most kezdődött el, hiszen a térképkészítő algoritmusokat illetően a térképek feldolgozására nincsen általánosan elfogadott javaslat. Ebben a fejezetben egy olyan algoritmust mutatok be, amelynek a fejlesztésében, optimalizálásában és a tesztelésében is részt vettem, és amely alkalmas a Herschel mérések idősoraiiban a háttér és a források szétválasztására, ezáltal forrásmentes térképek hozhatók létre, amelyeken vizsgálható a por által kibocsátott, kiterjedt emisszió, és a sűrű-ritka határfelületek is azonosíthatóvá válnak. Másrészt a háttértől megtisztított, csak a forrásokat tartalmazó térképek egy alternatív fotometriai módszert kínálnak az infravörös források, köztük nagy mennyiségű pre- és protosztelláris objektum fényességének megállapításához.

A kiterjedt emisszió vizsgálatához ún. "clean map"-ekre van szükség, vagyis olyan térképekre, amelyek mentesek a pontforrásoktól. A kompakt objektumok a képek teljesítményspektrumához számos térfrekvencián adhatnak járulékot, valamint módosítják

a képet a beam mérethez közeli frekvenciákon is. Attól függően, hogy a források milyen felületi sűrűséggel vannak jelen, vagy mennyire erősen tömörödnek halmazokba, az alacsonyabb térfrekvenciák kisebb erősséggel, de nagyobb tartományban szennyeződnek. Emiatt a képanalizáló technikák összehasonlítása is problematikusává válik. A különböző algoritmusok a diszkrét al-struktúrákra különböző mértékben érzékenyek. Azok a technikák, amelyek a gyakoriságot vizsgálják, akár pár pontforrás miatt is rossz eredményt adhatnak, míg a teljes intenzitást vizsgáló technikák nagyon érzékenyek a csoportosulásokra. Emiatt van szükség egy olyan algoritmusra, amely a jól definiált térfrekvenciákon belül eső forrásokat eltávolítja, és megfelel annak a nagyon fontos kritériumnak, hogy megtartsa a kép zajtulajdonságait.

Ennek a problémának a megoldására általában alkalmazott módszer, hogy megpróbálják az  $I(x, y)$  intenzitást a Level 2 (L2), vagyis pozíció-pozíció síkon modellezni és levonni a képről. De a probléma leeredukálható az 1 dimenziós Level 1 (L1) mérési idősorra, ahol levonható a forrás intenzitása és újra projektálható a kép.

A boloSource algoritmust standard csillagokra alkalmazva megmutatom, hogy a módszer alkalmas arra, hogy jó minőségű fotometriát végezzünk. Az így elvégzett fotometriára pedig példát is hozok, amiben egy kiterjedt emisszióba ágyazott FCsO fénygörbéjének távoli infravörös pontjait állítom elő.

## 6.1. Módszerek és megvalósítás

A Herschel mérések L1 idősora az egyes detektorpixelek 10 Hz frekvenciájú méréseiből állnak össze. Az  $I(t)$  idősor redukált dimenzionalitású az  $I(x, y)$  síkhoz viszonyítva, de a zajspektrum sokkal összetettebb.

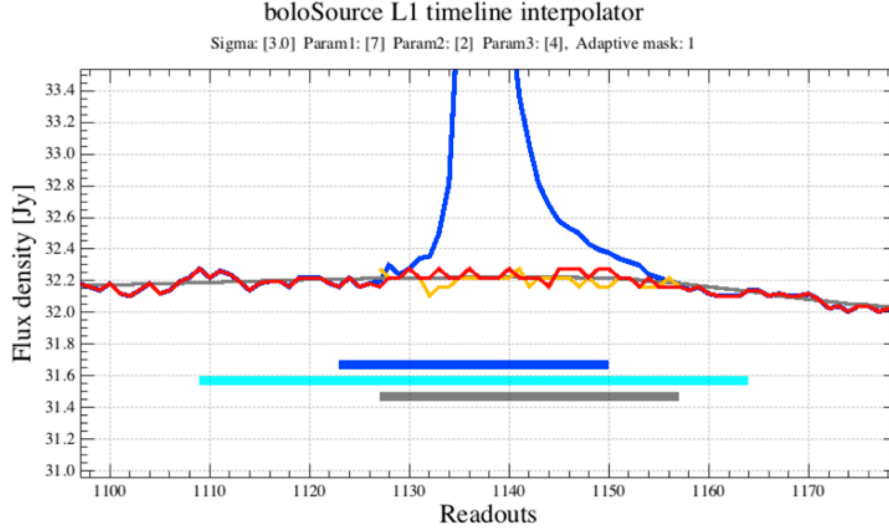
$$I(t) = N_{(t)}^{1/f} + N_{(t)}^D + N_{(t)}^{det} + I_{(t)}^S \quad (6.1)$$

A (6.1) egyenlet jobb oldalának első kifejezése adja meg az  $1/f$  zajt, a második tag a drift zajt, a harmadik tag írja le a detektorzajt, míg az utolsó tag a forrás intenzitását. Ezek összegéből áll az  $I(t)$  idősor. Az idősorban a jel/zaj arány is alacsonyabb, mint a projektált térképeken.

A források levonásánál elsősorban a nagyfrekvenciás jelet szeretnénk levonni. Az L2 térképeken megadott források pozíciója és mérete alapján kimaszkolhatók az idősor azon részei, amelyek a forráshoz járulnak hozzá. Ezeken az azonosított szakaszokon a szimulált zaj és a becsült égi háttér összegével interpolálunk. Egy ilyen interpolációra mutat példát a 6.1. ábra. Ha az interpolált idősort kivonjuk az eredeti idősorból, akkor egy olyan idősort kapunk eredményül, ami csak a forrásokat tartalmazza, vagyis készíthetünk olyan térképeket, amelyek mentesek az égi háttértől. Az így készített térképeken ismert fényességű csillagok fényességét megmérve megtudhatjuk, hogy megfelelően interpoláltunk-e,



és az interpolált adatsorból készített térképen látható égi háttér intenzitása megfelel-e annak, ami akkor lenne, ha valóban nem lenne az adott égi pozícióban egy csillag.



6.1. ábra. Példa az L1 idősorban történő interpolációra. A vékony, sötétkék vonal mutatja az eredeti idősort. Vékony, szürke vonal jelzi a becsült bázisvonalat (égi háttér). A sárga vonallal rajzolt interpolált jel Gauss-eloszlású zajt tartalmaz, míg a piros vonallal mutatott jel Monte-Carlo szimulált zajjal készült. A vízszintes sötétkék, világoskék és szürke vonalak mutatják a bemeneti maszk méretét, a kiterjesztett maszkot, valamint az optimalizált maszkot.

A PACS műszer fotometriai kalibrációjához (Müller és mtsai, 2011) használt standard csillagok segítségével teszteltem, hogy a boloSource algoritmus fotometriai célú alkalmazását. A mérések mini-scanmap módban készültek,  $20''/s$  szkensebességgel. A három PACS hullámhosszon jósolt fényességük fotoszférikus modellekből származik. A fényességadatokat a 6.1. táblázat tartalmazza. A 6.2. ábrán egy példa segítségével mutatom be az eredeti, az interpolált és a csak forrást tartalmazó térképeket.

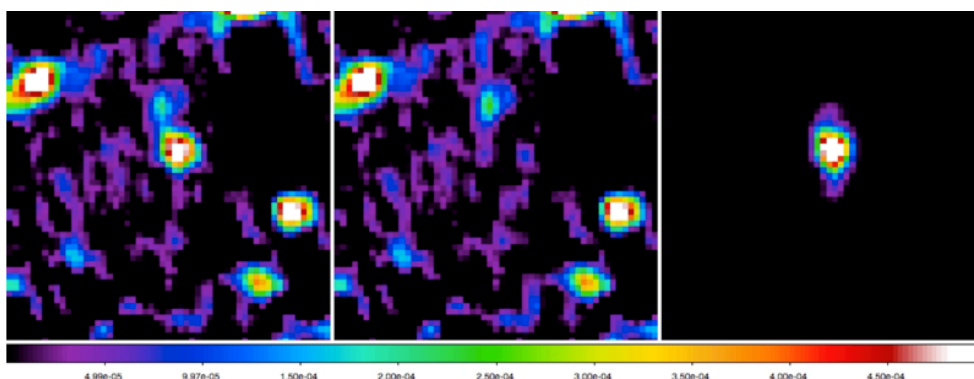
Első lépésként az említett standard csillagok megbízhatóságát vizsgáltam. Minden megfigyelés során a műszer többször végigpásztázta az adott égi területet, vagyis egy mérést több alkalommal is megismételt. Az első ismétléstől indulva, kettesével összeadva az egymás után következő ismétléseket. A térképek a Herschel Interactive Processing Environment (HIPE) segítségével készítettem. A források fényességét a HIPE beépített fotometriai rutinjai segítségével, és az IDL "aper" elnevezésű rutinja segítségével is mértem. Eredményül minden forrásra egy fénygörbét kaptam. A mérések stabilitását a fénygörbe pontjainak átlag körüli szórásával jellemeztem. Azért, hogy kizárjam a pointing hibákból adódó bizonytalanságot, a fotometriát elvégeztem több apertúra-sugárral is. A sugár nagyságát  $2''$ -tól  $10''$ -ig változtattam, egyesével. Az egyes fénygörbék átlagát

6.1. táblázat. A *boloSource* fotometriai képességeinek teszteléséhez használt standard csillag minta fényességei az egyes PACS hullámhosszakon.

Name	SpType	70 $\mu$ m [mJy]	100 $\mu$ m [mJy]	160 $\mu$ m [mJy]
HD 15008	A1/2V	22,0 $\pm$ 0,8	10,8 $\pm$ 0,4	4,2 $\pm$ 0,2
HD 152222	K2III	37,9 $\pm$ 1,8	18,6 $\pm$ 0,9	7,3 $\pm$ 0,3
HD 39608	K5III	29,6 $\pm$ 1,2	14,6 $\pm$ 0,6	5,7 $\pm$ 0,2
HD 159330	K2III	61,7 $\pm$ 2,0	30,2 $\pm$ 1,0	11,8 $\pm$ 0,4
HD 139669	K5III	286	140	54
HD 138265	K5III	111,4 $\pm$ 3,8	54,6 $\pm$ 1,9	21,3 $\pm$ 0,7
HD 170693	K1,5III	147,7 $\pm$ 4,4	72,4 $\pm$ 2,2	28,3 $\pm$ 0,8

is kiszámítottam. Ennek az átlagnak a segítségével meg tudtam mondani, hogy a kapott fényesség mennyire egyezik az adott forrás jóslott fényességével.

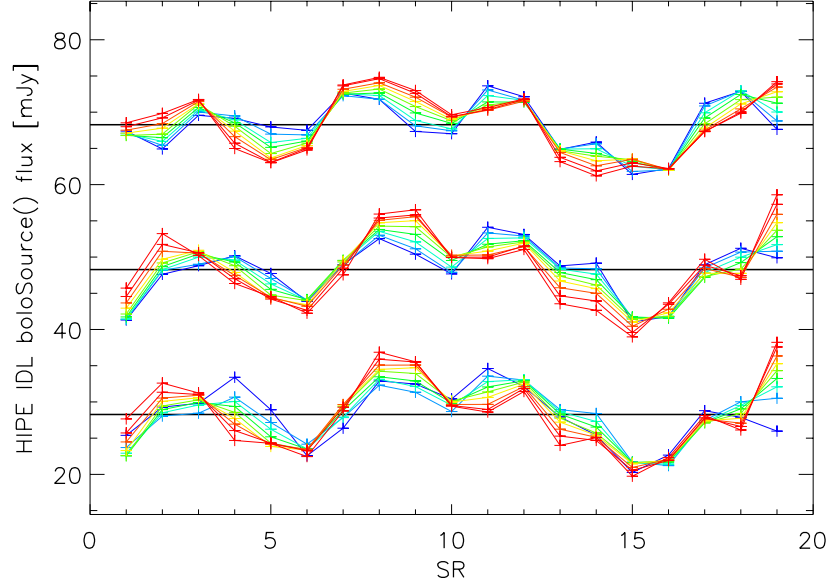
A második lépésben a kizárólag forrásokat tartalmazó idősor segítségével a fent leírt módon ismét fénygörbéket készítettem. A *boloSource* fluxusokat az IDL "aper" segítségével mértem, a fénygörbéket pedig szintén a korábban leírt átlaggal és az átlag körüli szórással jellemeztem. Az eredeti és a csak forrásokat tartalmazó térképek alapján kapott eredmények összevetésénél csak az IDL "aper" értékeket vettem figyelembe.



6.2. ábra. A *HD170693* jelű standard csillag 160 $\mu$ m-es térképei. A bal oldalon látható térkép az eredeti idősből készült, a középső kép az interpolált idősből, míg a jobb oldalon a különbségi idősből készített, csak a forrást tartalmazó kép látható.

## 6.2. Eredmények

Ahogy a 6.3. ábrán látható példa mutatja, függetlenül a fotometriai módszertől, a standard csillagok fényessége ingadozást mutat az idő függvényében. Ez az ingadozás nem szűnik meg akkor sem, ha kisebb, vagy nagyobb apertúra méretet használunk. Ezért a későbbiekben nem számítottam ki a fényességet minden apertúra mérettel, csak 5, 6 és 7 ívmásodperc sugarúakkal a 70, 100 és 160  $\mu$ m-es mérések esetében. Mivel az infra-



6.3. ábra. A *HD170693* jelű standard csillag  $160\mu\text{m}$ -en felrajzolt fénygörbéi. Alulról felfelé haladva láthatók a HIPE-pal, IDL-lel és a boloSource-szal előállított fénygörbék. A színskála a kéktől a vörös felé haladva a  $2''$ -től  $10''$ -ig terjedő apertúraméretekkel kapott fénygörbéket mutatja. A vízszintes tengelyen a kezdő ismétlés sorszáma látható.

vörös háttér erősen változik a hosszabb hullámhosszak felé haladva, ezért a fotometria megbízhatóságát csak egy-egy sávon belüli eredmények esetében hasonlítottam össze.

A  $70\mu\text{m}$ -en kapott eredményeket a 6.2. táblázatban foglaltam össze. Az eredményeket szemlélteti a 6.4. ábra. Az átlag körüli szórás medián értéke a hagyományos módszer esetében ( $\sigma_{IDL}$ ) 2,02-nak adódott, míg a boloSource esetében ( $\sigma_{bS}$ ) 3,19-nek. Az átlag körüli szórások átlaga 2,03 és 2,89 volt. A  $C$  korrekciós faktor esetében a mediánok 0,99 és 1,01, míg az átlagok 0,97 és 1,00 voltak.

A  $100\mu\text{m}$ -es mérések esetében az eredményeket a 6.3. táblázat tartalmazza, és a 6.5. ábra szemlélteti. A  $\sigma_{IDL}$  és a  $\sigma_{bS}$  értékek mediánja 3,32-nek és 3,80-nak adódott, az átlaguk pedig 2,77-nek és 3,65-nek. A  $C$  értékek mediánja 1,04 és 1,06 volt, az átlaguk pedig 1,01 és 1,04.

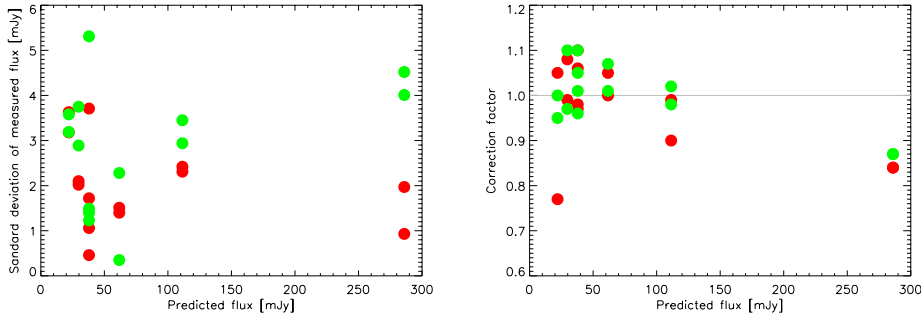
A leghosszabb hullámhosszon,  $160\mu\text{m}$ -en kapott eredmények a 6.4. táblázatban és a 6.6. ábrán láthatók. A  $\sigma_{IDL}$  és a  $\sigma_{bS}$  mediánja 5,31, valamint 3,80 volt, az átlaguk pedig 5,34 és 4,50. A  $C$  korrekció medián értéke 1,26-nak és 1,11-nek adódott, az átlaguk pedig 1,17 és 1,09 volt.

## 6.3. Következtetések

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a boloSource algoritmus teljes mértékben használható csillagok fotometriai fényességének megállapítására. Rövidebb hullám-

6.2. táblázat. A *standard csillagok* 70 $\mu$ m-en mért fénygörbéjére kiszámított  $\sigma$  és  $C$  paraméterek. Az oszlopok jelentése a következő: (1)standard csillag neve, (2)a fénygörbe előállításához használt *Herschel* mérés azonosító száma, (3)a mérésben található ismétlések száma, (4)a csillag elméleti fényessége, (5)-(6)az eredeti térképeken, *IDL* segítségével megállapított  $\sigma$  és  $C$  értékek, (7)-(8)a  $\sigma$  és  $C$  értékek a *boloSource*-szal előállított fénygörbék esetében.

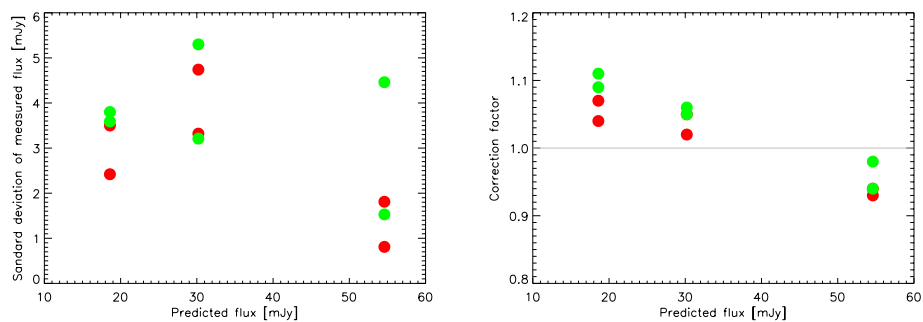
Név	OBSID	Ismétlések	Fényesség [mJy]	$\sigma_{IDL}$	$C_{IDL}$	$\sigma_{bS}$	$C_{bS}$
HD 15008	1342189130	9	22,0	3,63	1,05	3,58	1,00
HD 15008	1342189131	9	22,0	3,18	0,77	3,19	0,95
HD 152222	1342240702	6	37,9	3,71	0,98	5,31	1,01
HD 152222	1342240703	6	37,9	1,72	1,10	1,40	1,10
HD 152222	1342191964	6	37,9	1,06	0,97	1,23	0,96
HD 152222	1342191965	6	37,9	0,46	1,06	1,49	1,05
HD 39608	1342198535	10	29,7	2,10	1,08	3,75	1,10
HD 39608	1342198536	10	29,7	2,02	0,99	2,89	0,97
HD 159330	1342213585	6	61,7	1,40	1,00	0,35	1,01
HD 159330	1342213586	6	61,7	1,51	1,05	2,28	1,07
HD 139669	1342191982	6	286	0,93	0,84	4,01	0,87
HD 139669	1342191983	6	286	1,97	0,84	4,52	0,87
HD 138265	1342188841	21	111,4	2,31	0,90	2,94	0,98
HD 138265	1342188842	21	111,4	2,42	0,99	3,45	1,02



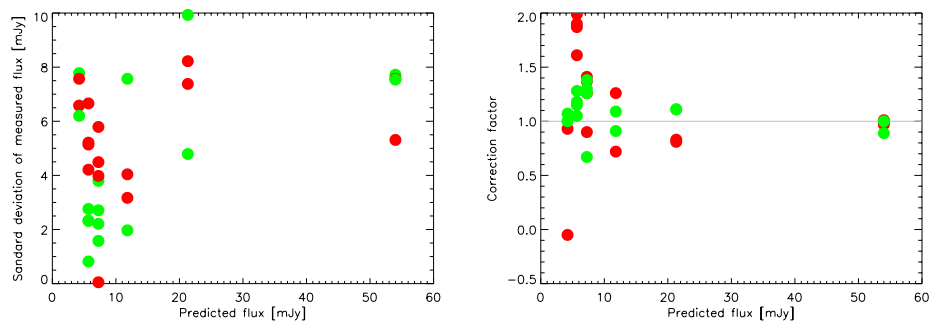
6.4. ábra. A  $\sigma$  (bal oldal) és  $C$  (jobb oldal) értékek az elméleti fényesség függvényében ábrázolva a 70 $\mu$ m-es esetben. A piros szimbólumok az eredeti térképek alapján számított értékeket jelölik, a zöld szimbólumok pedig a *boloSource* segítségével számítottakat.

6.3. táblázat. A táblázat megegyezik a 6.2. táblázattal, de a 100 $\mu$ m-es esetre kiszámított értékeket tartalmazza.

Név	OBSID	Ismétlések	Fényesség [mJy]	$\sigma_{IDL}$	$C_{IDL}$	$\sigma_{bS}$	$C_{bS}$
HD 152222	1342227973	33	18,6	2,42	1,04	3,59	1,09
HD 152222	1342227974	33	18,6	3,50	1,07	3,80	1,11
HD 159330	1342188839	10	30,2	4,74	1,02	5,30	1,05
HD 159330	1342188840	10	30,2	3,32	1,05	3,21	1,06
HD 138265	1342191986	6	54,6	1,81	0,94	1,53	0,98
HD 138265	1342191987	6	54,6	0,81	0,93	4,46	0,94

6.5. ábra. Megegyezik a 6.4. ábrával, de a  $100\mu\text{m}$ -es eset értékeit tartalmazza.6.4. táblázat. A táblázat megegyezik a 6.2. táblázattal, de a  $160\mu\text{m}$ -es esetre kiszámított értékeket tartalmazza.

Név	OBSID	Ismétlések	Fényesség [mJy]	$\sigma_{IDL}$	$C_{IDL}$	$\sigma_{bS}$	$C_{bS}$
HD 15008	1342189130	9	4,21	6,58	-0,05	7,78	1,07
HD 15008	1342189131	9	4,21	7,57	0,93	6,20	1,00
HD 152222	1342240702	6	7,25	0,05	0,90	2,21	0,67
HD 152222	1342240703	6	7,25	5,79	1,37	3,80	1,38
HD 152222	1342191964	6	7,25	3,98	1,26	1,58	1,30
HD 152222	1342191965	6	7,25	4,49	1,41	2,71	1,26
HD 39608	1342198535	10	5,68	4,21	1,87	0,82	1,28
HD 39608	1342198536	10	5,68	5,21	1,90	2,33	1,15
HD 39608	1342198537	35	5,68	6,66	1,61	2,32	1,18
HD 39608	1342198538	35	5,68	5,14	1,99	2,76	1,05
HD 159330	1342213585	6	11,81	3,17	1,26	1,97	1,09
HD 159330	1342213586	6	11,81	4,04	0,72	7,57	0,91
HD 139669	1342191982	6	54,0	5,31	1,01	7,72	1,00
HD 139669	1342191983	6	54,0	7,57	0,97	7,54	0,89
HD 138265	1342188841	21	21,32	8,22	0,83	9,93	1,11
HD 138265	1342188842	21	21,32	7,38	0,81	4,79	1,11

6.6. ábra. Megegyezik a 6.4. ábrával, de a  $160\mu\text{m}$ -es eset értékeit tartalmazza.

hosszakon, ahol az infravörös égi háttér kevésbé zavaró, a hagyományos fotometriai módszerrel átlagosan 1mJy-n belül egyező  $\sigma$  értékeket kaptam. A  $160\mu m$ -es esetben, ahol a háttér már erősebben is jelen van, a boloSource egy kicsit megbízhatóbb fényességértékeket produkál. A  $C$  összehasonlítása során arra az eredményre jutottam, hogy a standard csillagok elméleti fluxusának visszanyerésében szintén a hagyományos fotometriával megegyezően jó, 2%-os eltérésen belül található értékeket kaptam.

## 6.4. Alkalmazása

Az előzőekben bemutattam, hogy a boloSource algoritmus használható fotometriára. Olyan esetekben, ahol a forrás egy komplex háttér előtt, vagy a háttérsugárzást adó csillagközi anyagba beágyazva található, a hagyományos fotometriai módszerek kevésbé jól működnek. Ezekben az esetekben érdemes a boloSource-ot alkalmazni. Kóspál és mtsai (2013) a V2492 Cygni elnevezésű, az AKARI+WISE FCsO jelölteket tartalmazó katalógusomban is megtalálható fiatal, eruptív csillag fényességváltozásait és a csillag környezetét vizsgálták optikai és infravörös hullámhosszakon. Mivel az objektumot kiterjedt emisszió veszi körül, ezért a 4 epochában készült Herschel PACS méréseket körültekintően kellett kezelni. A háttér eltávolításhoz tehát a boloSource algoritmust használtam. Azokon a térképeken, amelyek csak a forrást tartalmazták, már lehetőség volt apertúra fotometriát végezni. Az előállított fényességértékek változása a 5% alatt volt minden PACS mérési sávban, így kijelenthető, hogy a V2492 Cyg semmilyen szignifikáns változást nem mutatott 2011. októbere és 2012. január között a távoli infravörös tartományban.







# Köszönetnyilvánítás

A dolgozat létrejöttéért elsősorban témavezetőmet, dr. Tóth L. Viktort illeti köszönet. Köszönöm a rengeteg időt, türelmet, jótanácsot és bizalmat, amik nélkül a tudományos helytállás sokkal nehezebb lett volna. Munkám feltételeinek biztosításáért köszönetet mondok az ELTE Csillagászati Tanszék jelenlegi és volt tanszékvezetőinek, dr. Petrovay Kristófnak és dr. Érdi Bálintnak, valamint a tanszék többi munkatársának is.

Köszönöm a MTA CSFK KTM Csillagászati Intézetének, különösen dr. Kiss Csabának, hogy az egyéb tennivalók mellett is támogatták a munkámat jótanácsaikkal, és lehetőséget teremtettek arra, hogy az infravörös csillagászattal foglalkozhassak. Köszönöm még dr. Vavrek Rolandnak, hogy részt vehettem a közös munkában, és hogy az eredmények bekerülhettek a dolgozatba. A statisztikus vizsgálatokkal kapcsolatos észrevételeit és útmutatásait köszönöm dr. Balázs Lajosnak. A Franciaországban, Toulouse-ban töltött hasznos időért köszönettel tartozom az Erasmus Programnak és a L’Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (IRAP) intézetnek, valamint ottani kollégáimnak: Isabelle Ristorcellinek és Ludovic Montiernek. Köszönöm még Zahorecz Saroltának, hogy a dolgozat alapjául szolgáló kutatások során fordulhattam hozzá segítségért, valamint Pál Andrásnak a hasznos megjegyzéseit.

Köszönöm a családomnak: szüleimnek, páromnak, Melindának és fiamnak, Gábornak, hogy mindvégig mellettem álltak és támogattak. Végül, de nem utolsó sorban köszönöm Magyar Gergely barátomnak, hogy a dolgozatot "magyarította".

Munkámhoz támogatást nyújtott:

- I) A Magyar Űrkutatási Iroda és a European Space Agency 98073 PECS szerződése.
- II) OTKA 101939 és 104607 számú pályázatok.
- III) Az Európai Unió az Európai Szociális Alap TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003. támogatási szerződése.

Munkám során felhasználtam a SIMBAD és VizieR adatbázisokat, valamint a Wide-field Infrared Survey Explorer és az AKARI műholdak adatait.



# Irodalomjegyzék

- [1] Adelman-McCarthy, J.K. és mtsai, 2012, ApJS, 203, 21
- [2] Alves, J., Lombardi, M., and Lada, C. J., 2007, A&A 462, L17
- [3] Alves de Oliveira, C. & Casali, M., 2008, A&A, 485, 155
- [4] Anderson, L. D., Zavagno, A., Deharveng, L. és mtsai, 2012, A&A, 542, 10
- [5] Ábrahám, P., Balázs, L. G., Kun, M., 2000, A&A, 354, 645
- [6] Ábrahám P., Dobashi K., Mizuno A. és mtsai, 1995, A&A, 300, 525
- [7] Barnard, E. E. 1907, ApJ, 25, 218
- [8] Beerer, I. M., Koenig, X. P., Hora, J. L. és mtsai, 2010, ApJ, 720, 679
- [9] Beuther, H., Kramer, C., Deiss, B., and Stutzki, J., 2000, A&A 362, 1109
- [10] Billot, N., Noriega-Crespo, A., Carey, S. és mtsai, 2010, ApJ, 712, 797
- [11] Blitz, L.: 1993, in Protostars and Planets III, pp 125-161
- [12] Brand, P. W. J. L. & Zealey, W. J. 1975, A&A, 38, 363
- [13] Bruhweiler, F. C., Gull, T. R., Kafatos, M. & Sofia, S., 1980, Ap, 238, L27
- [14] Burkert, A. & Hartmann, L. 2004, ApJ, 616, 288
- [15] Byun D.-Y., Koo B.-C.; Tatematsu K. & Sunada K., 2006, ApJ, 637, 283
- [16] Cartwright, A. & Whitworth, A. P. 2004, MNRAS, 348, 589
- [17] Castor, J., McCray, R., & Weaver, R., 1975, ApJ, 200, L107
- [18] Cazzolato, F.; Pineault, S., 2003, AJ, 125, 2050
- [19] Chauhan N., Pandey A.K., Ogura K. és mtsai, 2009, MNRAS, 396, 964
- [20] Churchwell, E.; Povich, M. S. és mtsai, 2006, ApJ, 649, 759,
- [21] Churchwell, E.; Watson, D. F.; Povich, M. S. és mtsai, 2007, ApJ, 670, 428
- [22] Covey, K. R., Ivezić, Ž., Schlegel, D., és mtsai, 2007, AJ, 134, 2398
- [23] Cutri R., M., Skrutskie, M.F., van Dyk, S. és mtsai, 2003, 2MASS All Sky Catalog of point sources, NASA/IPAC Infrared Science Archive

- [24] Cutri, R. M.; és mtsai, 2012, WISE All-Sky Data Release, NASA/IPAC Infrared Schience Archive
- [25] Dame, T. M., Hartmann, D. & Thaddeus, P., 2001, ApJ, 547, 792
- [26] Deharveng, L., Schuller, F., Anderson, L. D. és mtsai., 2010, A&A, 523, 6
- [27] Efremov, Yu.N., & Elmegreen, B. G., 1998, MNRAS, 299, 643
- [28] Ehlerová, S., & Palouš, S. 1996, A&A, 313, 478
- [29] Ehlerová, S., Palouš, J., Theis, Ch., Hensler, G., 1997, A&A, 328, 121
- [30] Ehlerová, S., & Palouš, J. 2005, A&A, 437, 101
- [31] Elmegreen, B. G. & Lada, C. J. 1977, ApJ, 214, 725
- [32] Elmegreen, B. G., 1994 ApJ, 427, 384
- [33] Elmegreen, B. G., 1998 ASPC, 148, 150
- [34] Elmegreen, B. G. 2002, ApJ, 564, 773
- [35] Elmegreen, B. G., 2011, arXiv,:1101.3112
- [36] Emerson, J.P. 1987, IAUS, 115, 19.
- [37] Everitt, B. S. and G. Dunn, Applied Multivariate Data Analysis, 2nd edition, Arnold Publishers, New York, 2001.
- [38] Ewen, H. I., Purcell, E. M., 1951, Nature, 168, 356
- [39] Getman K.V., Feigelson, E.D., Sicilia-Aguilar A. és mtsai, 2012, MNRAS, 426, 2917
- [40] Goudis, C., Meaburn, J. 1978, A&A, 68, 189
- [41] Gower, J. C. & Ross, G. J. S. 1969, Appl. Stat., 18, 54
- [42] Griffin, M. J., Abergel, A., Abreu, A. és mtsai, 2010, A&A, 518, 3
- [43] Gritschneder, M., Naab, T.,Walch, S., Burkert, A., & Heitsch, F. 2009, ApJ, 694, L26
- [44] Gutermuth, R. A., Myers, P. C., Megeath, S. T. és mtsai, 2008, ApJ, 674, 336
- [45] Gutermuth, R. A., Megeath, S. T., Myers, P. C., és mtsai, 2009, ApJS, 184, 18
- [46] Gyulbudaghian, A. L., May, J., 1999, Ap, 42, 132

- [47] Heiles, C. & Habing, H. J. 1974, A&AS, 14, 1
- [48] Heiles, C., 1979, ApJ, 229, 533
- [49] Heiles, C. 1980, ApJ, 235, 833
- [50] Heiles, C. 1984, ApJS, 55, 585
- [51] Herbig, G.H.; Andrews, S.M.; Dahm, S.E., 2004, AJ, 128, 1233
- [52] Hernandez, J., Hartmann, L., Megeath, T. és mtsai, 2007a, ApJ, 662, 1067
- [53] Hernandez, J., Calvet, N., Briceno, C. és mtsai, 2007b, ApJ, 671, 1784
- [54] Hu, E. M. 1981, ApJ, 248, 119
- [55] Jung, J.-H., Koo B.-C. & Kang Y.-H., 1996, AJ, 112, 1625
- [56] Kang, S.-J., Kerton, C. R., 2012, ApJ, 759, 13
- [57] Kang, J.-H., Koo, B.-C., Salter, C., 2012AJ, 143, 75
- [58] Kawada, M. és mtsai, 2007, PASJ 59, S389–S400
- [59] Kerton C.R., Brunt C.M., 2003, A&A, 399, 1083
- [60] Kim, J., Balsara, D., & Mac Low, M.-M. 2001, JKAS, 34, 333
- [61] Kirk, J.M., Ward-Thompson, D., Di Francesco, J. és mtsai, 2009, ApJS, 185, 198
- [62] Kiss, Cs., Moór, A. & Tóth, L. V. 2004, A&A, 418, 131
- [63] Kiss Zoltán Tamás, Spontán folyamat-e a csillagkeletkezés?, 2008, doktori értekezés
- [64] Klessen, R. S., Hietsch, F., & Mac Low, M. M. 2000, ApJ, 535, 887
- [65] Klessen, R. S. 2011, EAS, 51, 133
- [66] Koenig, X.P., Allen, L.E., Gutermuth, R.A., 2008, ApJ, 688, 1142
- [67] Koenig, X. P., Leisawitz, D. T., Benford, D. J. és mtsai, 2012, ApJ, 744, 130
- [68] Könyves, V., Kiss, Cs., Moór, A., Kiss, Z. T. & Tóth, L. V. 2007, A&A, 463, 1227
- [69] Koo, B.-C., & Heiles, C. 1991, ApJ, 382, 204
- [70] Korpi, M. J., Brandenburg, A., Shukorov, A., & Tuominen, I. 1999, A&A, 350, 230
- [71] Kóspál Ágnes, An Infrared and Optical View of Young Eruptive Stars, 2009, doktori értekezés

- [72] Kóspál, Á., Ábrahám, P., Acosta-Pulido, J. A. és mtsai, 2013, *A&A*, 551, 62
- [73] Kramer, C., Stutzki, J., Rohrig, R., and Corneliussen, U., 1998, *A&A* 329, 249
- [74] Kronberger, M., Teutsch, P., Alessi, B. és mtsai, 2006, *A&A*, 447, 921
- [75] Kun, M., Balázs, L. G., Tóth, I., 1987, *Ap&SS*, 134, 211
- [76] Lada, C. J., Muench, A. A., Rathborne, J., Alves, J. F., and Lombardi, M., 2008, *ApJ* 672, 410
- [77] Landsman, W. B., 1993, *ASPC*, 52, 246
- [78] Large, M. I., Quigley, M. J. S., & Haslam, C. G. T. 1962, *MNRAS*, 124, 405
- [79] Large, M. I., Quigley, M. J. S., & Haslam, C. G. T. 1966, *MNRAS*, 131, 335
- [80] Lee H.-T., Chen W.P.; Zhang Z.-W. & Hu J.-Y., 2005, *ApJ*, 624, 808
- [81] Lee, H.-T. & Chen, W. P. 2007, *ApJ*, 657, 884
- [82] Lee, H.-T. & Chen, W. P. 2009, *ApJ*, 694, 1423
- [83] Liu, W.M., Padgett, D.L., Leisawitz, D., Fajardo-Acosta, S. & Koenig X.P., 2011, *ApJ*, 733, 2
- [84] Loren, R. B. 1976, *ApJ*, 209, 466
- [85] Lyder, D. A., 1998, *JRASC*, 92, 25
- [86] Lynds B. T., 1962, *ApJS*, 7, 1
- [87] Mac Low, M. & Klessen, R. S.: 2004, *Reviews of Modern Physics* 76, 125
- [88] Mahalanobis, P. C., 1936, "On the generalised distance in statistics", *Proceedings of the National Institute of Sciences of India* 2 (1): 49–55
- [89] Majaess D, 2013, *Ap&SS*, 344, 175
- [90] Małek, K., Solarz, A., Pollo, A. és mtsai, 2013, arXiv:1303.2621v2 [astro-ph.CO]
- [91] Marshall, D. J., Robin, A. C., Reylé, C., Schultheis, M., & Picaud, S. 2006, *A&A*, 453, 635
- [92] Marshall, D. J., Joncas, G., & Jones, A. P. 2009, *ApJ*, 706, 727
- [93] McKee, C. F.: 1999, in C. J. Lada and N. D. Kyla  
s (eds.), *NATO ASIC Proc. 540: The Origin of Stars and Planetary Systems*, p. 29

- [94] McLachlan, G. J., 1992, *Discriminant Analysis and Statistical Pattern Recognition* (Wiley, New York)
- [95] Mookerjee, B., Sandell, G., Jarrett, T.H. & McMullin J.P., 2009, *A&A*, 507, 1485
- [96] Morales-Calderon, M., Stauffer, J.R., Rebull, L. és mtsai, 2009, *ApJ*, 702, 1507
- [97] Morgan L.K., Thompson M.A., Urquhart J.S., White G.J., Miao J., 2004, *A&A*, 426, 535
- [98] Murakami, H., és mtsai, 2007, *PASJ* 59, 369
- [99] Müller, Th., Nielbock, M., Balog, Z., Klaas, U., Vilenius, E., 2011, *PICC-ME-TN-037*
- [100] Myers, P. C., Fuller, G. A., Mathieu, R. D. és mtsai, 1987, *ApJ*, 319, 340
- [101] Neugebauer, G., Habing, H. J., van Duinen, R. és mtsai, 1984, *ApJ*, 278, 1
- [102] Oort, J. H., van de Hulst, H. C., 1946, *BAN*, 10, 187
- [103] Peterson, D.E., Caratti o Garatti, A., Bourke, T.L., 2011, *ApJS*, 194, 43
- [104] Pillitteri, I., Sciortino, S., Flaccomio, E. és mtsai, 2010, *A&A*, 519, 34
- [105] Poglitsch, A., Waelkens, C., Geis, N. és mtsai, *A&A*, 518, 2 (2010)
- [106] Pomarès, M., Zavagno, A., Deharveng, L. és mtsai, 2009, *A&A*, 494, 987
- [107] Povich, M.S., Smith, N., Majewski, S.R. és mtsai, 2011, *ApJS*, 194, 14
- [108] Prisinzano, L., Micela, G., Flaccomio, E. és mtsai, 2008, *ApJ*, 677, 401
- [109] Rebull, L.M., Padgett, D.L., McCabe,C.-E. és mtsai, 2010, *ApJS*, 186, 259
- [110] Rebull, L.M., Guieu, S., Stauffer, J.R. és mtsai, 2011, *ApJS*, 193, 25
- [111] Robertson, B. E. & Kravtsov, A. V., 2008, *ApJ*, 680, 1083
- [112] Robin, A., Reylé, C., Derrière, S., & Picaud, S. 2003, *AAP*, 409, 523
- [113] Robitaille, Th. P., Whitney, B. A., Indebetouw, R., Wood, K., Denzmore, P., 2006, *ApJS*, 167, 256
- [114] Román-Zúñiga, C. G., Elston, R., Ferreira, B., & Lada, E. A. 2008, *ApJ*, 672, 861
- [115] Román-Zúñiga, C. G. & Lada, E. A. 2008, *Star Formation in the Rosette Complex* (ASP Monograph), 928

- [116] Rygl, K. L. J., Brunthaler, A., Reid, M. J., és mtsai, 2010, *A&A*, 511, A2
- [117] Sato, M., Hirota, T., Honma, M., és mtsai, 2008, *PASJ*, 60, 975
- [118] Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P. & Davis, M., 1998, *ApJ*, 500, 525
- [119] Seldner, M., Siebers, B., Groth, E. J., Peebles, P. J. E., 1977, *AJ*, 82, 249
- [120] Shetty, R., Glover, S. C., Dullemond, C. P. & Klessen, R. S., 2011, *MNRAS*, 412, 1686
- [121] Shu, F. H., 1977, *ApJ*, 214, 488
- [122] Simpson, R. J.; Povich, M. S.; Kendrew, S. és mtsai, 2012, arXiv1201.6357
- [123] Skrutskie, M., Cutri, R., Stiening, R., és mtsai, 2006, *AJ*, 131, 1163
- [124] Snider, K. D., Hester, J. J., Desch, S. J., Healy, K. R. & Bally, J. 2006, *AAS/AAPT*, 38, 1054
- [125] Stock, D.J. & Barlow, M.J., 2010, *MNRAS*, 409, 1429
- [126] Stutzki, J. and Güsten, R., 1990, *ApJ* 356, 513
- [127] Tachihara, K., Onishi, T., Mizuno, A. & Fukui, Y. 2002, *A&A*, 385, 909
- [128] Tatematsu, K., Fukui, Y., Landecker, T. L. & Roger, R. S., 1990, *A&A*, 237, 189
- [129] Tauber, J. A., Mandolesi, N., Puget, J., és mtsai, 2010, *A&A*, 520, A1
- [130] Tenorio-Tagle, G., 1981, *AA*, 94, 338
- [131] Tenorio-Tagle, G., & Bodenheimer, P., 1988, *ARA&A*, 26, 145
- [132] Toribio, M. Carmen, Solanes, José M., 2009, *AJ*, 138, 1957
- [133] Uyaniker, B., Fürst, E., Reich, W és mtsai, 2001, *A&A*, 371, 675
- [134] Vapnik, V. N. 1995, *The Nature of Statistical Learning Theory* (Springer)
- [135] Venables, W. N. and Ripley, B. D. (2002) *Modern Applied Statistics with S*. Fourth edition. Springer.
- [136] Verebélyi E., Könyves V., Nikolic S. és mtsai, 2013, *AN*, in print.
- [137] Wackerling, L. R., 1970, *Mem. R.A.S.* 73, 153
- [138] Wada, K., Spaans, M., & Kim, S. 2000, *ApJ*, 540, 797



- [139] Ward-Thompson, D., André, P., Crutcher, R., Johnstone, D., Onishi, T., and Wilson, C., 2007, in B. Reipurth, D. Jewitt, and K. Keil (eds.), *Protostars and Planets V*, pp 3346
- [140] Weaver, H. & Williams, D. R. W. 1973, *A&AS*, 8, 1
- [141] Wilcots, E.M., & Miller, B.W. 1998, *AJ*, 116, 2363
- [142] Williams, J. P., de Geus, E. J., and Blitz, L.: 1994, *ApJ* 428, 693
- [143] Williams, J. P., Blitz, L., & Stark, A. A. 1995, *ApJ*, 451, 252
- [144] Williams, J. P., Blitz, L., and McKee, C. F., 2000, *Protostars and Planets IV* p. 97
- [145] Winston, E., Megeath, S.T., Wolk, S.J. és mtsai, 2010, *AJ*, 140, 266
- [146] Withworth, A. P., Bhattal, A. S., Chapman, S. J., Disney, M. J., Turner, J. A., 1994, *A&A*, 290, 421
- [147] Wright, Edward L., Eisenhardt, Peter R. M., Mainzer, Amy K. és mtsai, 2010, *AJ*, 140, 1868
- [148] Yamamura, I., Makiuti, S., Ikeda, N. és mtsai, 2010, *yCat*, 2298,0Y
- [149] Zavagno, A., Pomarès, M., Deharveng, L. és mtsai, 2007, *A&A*, 472, 835



# Táblázatok jegyzéke

2.1.	A Planck űrtávcső érzékelő műszereinek adatai . . . . .	16
2.2.	A C3PO és a MC szimulációk felületi sűrűségének eloszlása a TAPO területen és a teljes égbolton, összevetésben a HI héjakkal . . . . .	20
2.3.	A C3PO és a MC szimulációk felületi sűrűségének eloszlása a TAPO területen . . . . .	23
2.4.	A C3PO és a MC szimulációk esetében számított $N/E(B-V)$ arány eloszlása a teljes égbolton, összevetésben az infravörös hurkokkal . . . . .	25
2.5.	A C3PO objektumok fizikai paramétereinek átlagos értéke és átlag körüli szórása . . . . .	28
2.6.	A hideg magok fizikai paramétereinek átlagos értéke és átlag körüli szórása	30
3.1.	Az AKARI FIS mérési sávjai és azok sáv szélessége . . . . .	32
3.2.	A galaxisok és FCsO-ok átlagos színe és fényessége . . . . .	37
3.3.	A galaxisok és FCsO-ok száma és aránya . . . . .	37
3.4.	AKARI adatok alapján LDA segítségével kapott válogatás SIMBAD asszociáltjai . . . . .	40
3.5.	Az AKARI adatok alapján QDA segítségével kapott válogatás SIMBAD asszociáltjai . . . . .	41
3.6.	Az AKARI+WISE adatok felhasználásával, QDA alapján kapott válogatás SIMBAD asszociáltjainak darabszáma . . . . .	44
3.7.	Az AKARI+WISE adatok felhasználásával, QDA alapján kapott válogatás SIMBAD asszociáltjainak százalékos megoszlása . . . . .	44
4.1.	A megfigyelt és a szimulált $N/E(B-V)$ értékek eloszlása a teljes égbolton .	50
4.2.	A megfigyelt és a szimulált $N/E(B-V)$ értékek eloszlása az IN, ON és OFF régiók esetében a külső Galaxisban . . . . .	52
4.3.	A külső Galaxisban szignifikánsan aktívnek mutató hurkok listája. . .	55
4.4.	A Herschel által leért hideg magok környezetében megtalálható AKARI FCsO-ok száma . . . . .	60
4.5.	A FCsO-t tartalmazó és FCsO nélküli hideg magok fizikai paramétereinek átlaga, mediánja és az átlag körüli szórása . . . . .	62
5.1.	A négy vagy annál több tagú csoportok tulajdonságai . . . . .	80
5.2.	CO felhőcsomók általános jellemzői és csillagkeletkezési aktivitásuk . . .	82
6.1.	A standard csillagok fényessége . . . . .	88

6.2. A standard csillagok $70\mu m$ -en mért fénygörbéjére kiszámított $\sigma$ és $C$ paraméterek . . . . .	90
6.3. A standard csillagok $100\mu m$ -en mért fénygörbéjére kiszámított $\sigma$ és $C$ paraméterek . . . . .	90
6.4. A standard csillagok $160\mu m$ -en mért fénygörbéjére kiszámított $\sigma$ és $C$ paraméterek . . . . .	91

# Ábrák jegyzéke

1.1. Egy csillagközi gyűrű vázlatos rajza . . . . .	6
1.2. A protocsillagok spektrális energia-eloszlása . . . . .	11
1.3. Csillagkeletkezés egy táguló buborék falában . . . . .	13
2.1. Teljes égbolt kép a Planck 9 sávú mérései alapján . . . . .	18
2.2. A C3PO források felületi sűrűsége . . . . .	19
2.3. A C3PO és a MC szimulációk felületi sűrűségének eloszlása a TAPO területen és a teljes égbolton, összevetésben a HI héjakkal . . . . .	21
2.4. Relatív vörösödés többlet a távoli-infravörös hurkokon . . . . .	21
2.5. C3PO felületi sűrűség a TAPO területen . . . . .	22
2.6. A C3PO és a MC szimulációk felületi sűrűségének eloszlása a TAPO területen . . . . .	23
2.7. A C3PO és a MC szimulációk esetében számított $N/E(B-V)$ arány eloszlása a teljes égbolton, összevetésben az infravörös hurkokkal . . . . .	24
2.8. A C3PO csomók pozíciószöge és a Planck megfigyelési szög összehasonlítása . . . . .	27
2.9. A C3PO objektumok becsült fizikai paramétereinek eloszlása . . . . .	29
3.1. AKARI FIS válaszfüggvények . . . . .	32
3.2. Az AKARI FIS BSC források galaktikus eloszlása . . . . .	33
3.3. Az AKARI N160 sáv PSF-je . . . . .	33
3.4. Kétszín diagramok . . . . .	34
3.5. Szín-fényesség diagramok . . . . .	36
3.6. A FCsO csoporthoz tartozás valószínűségi eloszlása LDA alapján . . . . .	39
3.7. A FCsO csoporthoz tartozás valószínűségi eloszlása QDA alapján . . . . .	41
3.8. A WISE álaszfüggvények . . . . .	42
3.9. A FCsO csoporthoz tartozás valószínűségi eloszlása QDA alapján, AKARI+WISE adatok felhasználásával . . . . .	43
3.10. A galaxisokhoz (bal oldal) és elfejlődött csillagok csoportjához (jobb oldal) tartozás valószínűségi eloszlása QDA alapján, AKARI+WISE adatok felhasználásával . . . . .	43
4.1. Az AKARI FCsO jelöltek galaktikus felületi sűrűség-eloszlása . . . . .	46
4.2. Az AKARI FCsO jelöltek galaktikus eloszlása . . . . .	47
4.3. Az AKARI FCsO jelöltek $db/W(CO)$ aránya . . . . .	49
4.4. Az AKARI FCsO jelöltek $db/W(CO)$ aránya az Orionban . . . . .	49
4.5. Az $N/E(B-V)$ értékek eloszlása a teljes égen . . . . .	50

4.6. Az egyes infravörös hurkok aktivitását mutató hisztogram . . . . .	51
4.7. A csillagkeletkezési aktivitást mutató és a szignifikánsan aktív infravörös hurkok a teljes égbolton . . . . .	51
4.8. Az $N/E(B-V)$ értékek eloszlása a külső Galaxisban . . . . .	52
4.9. A csillagkeletkezési aktivitást mutató és a szignifikánsan aktív infravörös hurkok a külső Galaxisban . . . . .	53
5.1. A WISE almintá forrásainak galaktikus felületi sűrűség-eloszlása terület- tartó Aitoff-vetületben . . . . .	64
5.2. A WISE almintá forrásainak galaktikus felületi sűrűség-eloszlása terület- tartó Aitoff-vetületben . . . . .	65
5.3. A SIMBAD segítségével azonosított extragalaktikus források felületi sű- rűségének eloszlása galaktikus koordinátarendszerben, Aitoff vetületben .	66
5.4. A Schlegel és mtsai (1998) $E(B-V)$ értékek alapján meghatározott galak- tikus területek . . . . .	66
5.5. QDA segítségével extragalaktikus objektumként klasszifikált WISE forrá- sok felületi sűrűségének eloszlása . . . . .	67
5.6. A SIMBAD segítségével azonosított mezőcsillagok felületi sűrűségének el- oszlása . . . . .	68
5.7. QDA segítségével mezőcsillagként klasszifikált WISE források felületi sű- rűségének eloszlása . . . . .	68
5.8. QDA segítségével elfejlődött csillagként klasszifikált WISE források felületi sűrűségének eloszlása . . . . .	70
5.9. QDA segítségével csillagközi anyaghoz kapcsolódó objektumként klasszi- fikált WISE források felületi sűrűségének eloszlása . . . . .	70
5.10. QDA segítségével FCsO jelöltként klasszifikált WISE források felületi sű- rűségének eloszlása . . . . .	71
5.11. SVM segítségével Class I, II, III típusú FCsO jelöltként klasszifikált WISE források felületi sűrűségének eloszlása . . . . .	74
5.12. A Koenig et al. (2012) klasszifikációs kritériumok alapján adódó objek- tumtípusok felületi sűrűség eloszlása . . . . .	76
5.13. Az LDN 1188 felhő hamisszínes RGB képe, rajta az azonosított FCsO jelöltekkel . . . . .	77
5.14. A MST ághosszak kumulatív eloszlása . . . . .	78
5.15. MST-vel azonosított FCsO csoportok az LDN 1188 területén . . . . .	79
5.16. FCsO jelöltek és molekuláris felhőmagok az LDN 1188-ban . . . . .	81
6.1. Példa a L1 idősorban történő interpolációra . . . . .	87
6.2. A HD170693 jelű standard csillag $160\mu m$ -es térképei . . . . .	88

6.3.	A HD170693 jelű standard csillag $160\mu m$ -en felrajzolt fénygörbéi . . . . .	89
6.4.	A $\sigma$ és $C$ értékek az elméleti fényesség függvényében ábrázolva a $70\mu m$ -es esetben . . . . .	90
6.5.	A $\sigma$ és $C$ értékek az elméleti fényesség függvényében ábrázolva a $100\mu m$ -es esetben . . . . .	91
6.6.	A $\sigma$ és $C$ értékek az elméleti fényesség függvényében ábrázolva a $160\mu m$ -es esetben . . . . .	91





# Összefoglaló

A csillagközi anyag (CSKA) meghatározza a születő csillagok elhelyezkedését. Ugyanakkor a csillagkeletkezés és a csillagfejlődés dinamikai folyamatai hatással vannak a CSKA szerkezetére. Olyan buborék, hurok vagy héj alakú határfelületeket hozhatnak létre, amelyek átmenetek a sűrű és a ritka CSKA között. Dolgozatomban áttekintettem ezen struktúrák kialakulásának és csillagkeletkezésre gyakorolt hatásuknak az elméleti hátterét, valamint a szub-milliméteres és infravörös hullámhossztartományban méréseket végző űrtávcsövek adatainak segítségével megvizsgáltam a kapcsolatot a Tejútrendszer sűrű-ritka határfelületei és a csillagkeletkezés korai állapotában található objektumok eloszlása között.

Tanulmányoztam a Planck űrtávcső által detektált pre-sztelláris felhőcsomók eloszlását és kapcsolatukat az atomos hidrogénből álló héjakkal, valamint a por eloszlásában megfigyelhető hurkokkal. Mindkét típusú határfelületen szignifikáns többletet mutat a csomók felületi sűrűsége, de a sűrűség-többlet jelentősebb a porból álló hurkok esetében.

Számos módszert teszteltem, hogy az AKARI űrtávcső által detektált távoli-infravörösben fényes pontoforrások alapján a kiterjedt porburokkal rendelkező fiatal csillagszerű objektumoknak (FCsO) egy megbízható katalógusát állíthassam elő. További közép-infravörös WISE adatok segítségével, kvadratikus diszkriminancia analízis alapján  $\sim 44000$  FCsO jelöltet tartalmazó katalógust készítettem. Az álpozitív klasszifikációk arányát a SIMBAD adatbázis alapján kevesebb mint 5%-nak találtam.

Az AKARI FCsO-ok eloszlását összevettem az infravörös hurkok eloszlásával, és szignifikáns korrelációt találtam, amely nem a hurkok irányában látható megnövekedett oszlopsűrűségnek köszönhető. Egyenként megvizsgálva őket találtam inaktív és aktív hurkokat. Utóbbiakról részletes leírást készítettem, beleértve azokat az objektumokat, amelyek felelősek lehetnek az indukált csillagkeletkezésért az adott égi területen.

A WISE űrtávcső közép-infravörös és a 2MASS közeli-infravörös pontforrás katalógusok alapján elkészítettem a kiterjedt proto-planetáris koronggal rendelkező, valamint a fősorozat előtti csillagok  $\sim 2,5$  millió forrást tartalmazó katalógusát. A tévesen klasszifikált források aránya kevesebb mint 1%. Az eloszlásukat és csoportosulásukat vizsgáltam egy sötét molekulafelhő területén, amely a jól ismert Cep OB2 asszociáció körüli, határfelületnek tekinthető molekulagyűrűben helyezkedik el. A felhő CO magjai körül különböző fejlődési állapotú, és csoportosulási jellemzőikben is eltérő FCsO-ok találhatók.

A legújabb infravörös csillagászati mérésekkel kapcsolatban bemutattam a boloSource algoritmust, amelynek részt vettem a fejlesztésében, és én optimalizáltam a Herschel űrtávcső méréseire. A módszer segítségével szétválasztható a kompakt források és a diffúz háttér jele. Az algoritmus fotometriai képességeit egy fotometriai kalibrációhoz használt standard csillag mintán mutattam be, és azt találtam, hogy az 5%-os kalibrációs hibahatáron belül az elméletileg várható fluxus ezzel a módszerrel visszakapható.



# Summary

The distribution of the interstellar medium (ISM) determines where young stars are born. At the same time, the dynamical processes of star formation and stellar evolution affect the ISM distribution and are capable of creating interfaces, which are boundary layers between the high- and low-density ISM in the form of bubbles, rings and shells. In my thesis I overviewed the theory of these objects, and their impact on star formation, and based on spaceborne sub-millimetre and infrared observations I investigated the connection between the interfaces found in the Milky Way's ISM and the objects being in the early phases of star formation.

I analysed the correlation between the distribution of pre-stellar clumps discovered by the Planck satellite and studied its correlation with that of the atomic hydrogen shells and with that of the loops found in the interstellar dust. As a result I found that there is a statistically significant excess on both types of interfaces, but the overdensity is more prominent on the infrared dust loops.

Various methods were tested with the aim of creating a reliable catalogue of young stellar object (YSO) candidates with extended dust envelope, based on the bright far-infrared point source detections of the AKARI satellite. By using additional mid-infrared WISE data and based on Quadratic Discriminant Analysis I was able to compile a catalogue of  $\sim 44000$  candidates. The ratio of the false-positive classifications was calculated with the help of SIMBAD database and it is less than 5%.

The galactic distribution of the AKARI YSOs was compared to that of the infrared dust loops and I found a statistically significant correlation. By investigating the individual loops I found that there are inactive and active loops. I gave a detailed description about the active ones, including the objects which might triggered the star formation.

Based on mid-infrared WISE satellite data and near-infrared 2MASS data I created a catalogue of young stars with extended proto-planetary disk and of pre-main-sequence stars, including  $\sim 2.5$  million sources. The ratio of false-positive classifications in the catalogue was found being less than 1%. I studied their distribution and grouping in a region of a dark cloud, which is located on a well-known interface, the molecular ring around the Cep OB2 association. I found that YSOs with various evolutionary and grouping properties are located around the CO cores of the cloud.

With respect to the present infrared astronomy I introduced the boloSource algorithm, which I developed in collaboration and I optimised it for the measurements of the Herschel Space Observatory. The method is capable of separating the signal of compact sources and diffuse background emission in the observational timeline data. I showed the photometric capabilities of the method on a set of standard stars used also for photometric calibration, and I found that the method is able to recover the predicted flux within the 5% calibration uncertainty.